



Technische  
Universität  
Braunschweig

INSTITUT FÜR  
mobile Maschinen  
und Nutzfahrzeuge



# Forschungsberichte

**Jan Schattenberg**

## **Netzerkundung zum ad-hoc Datenaustausch zwischen mobilen Maschinen**

Herausgeber:  
Freundes- und Förderkreis des Instituts  
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

# **Netzerkundung zum ad-hoc Datenaustausch zwischen mobilen Maschinen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jan Rüdiger Schattenberg

aus: Wolfenbüttel

eingereicht am: 24.10.2019

mündliche Prüfung am: 17.01.2020

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs  
Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer

2020



Forschungsberichte aus dem  
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

**Jan Schattenberg**

**Netzerkundung zum ad-hoc Datenaustausch  
zwischen mobilen Maschinen**

Shaker Verlag  
Düren 2020



**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7291-4

ISSN 2196-7369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik bzw. nach der Umbenennung am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig.

Zunächst danke ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs, für die Übernahme der Betreuung der Arbeit, die mir gegebene Möglichkeit, das begonnene Thema fortzusetzen und die nachhaltige Aufforderung, diese, auch und trotz der Übernahme vieler Aufgaben im Institut, zu beenden. Die Arbeit wurde unter meinem damaligen Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Thorsten Lang begonnen, der im April 2014 jedoch tragischer Weise verstorben ist. Sowohl während der Zeit der Institutsleitung durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, als auch während der Interimsphase von 2010 bis 2011 durfte ich mich zudem schon früh in der Unterstützung der Leitung des Instituts engagieren. Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, der mir die Möglichkeit gegeben hat, mein studentisches Engagement am Institut im Rahmen der studentischen Gruppe FREDT anschließend auch als wissenschaftlicher Mitarbeiter fortzusetzen. Darüber hinaus danke ich ihm für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Zudem gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer für die Übernahme des Mitberichts.

Den Projektpartnern, besonders denen aus dem Projekt in dessen Rahmen die Forschungsfrage dieser Arbeit entstand, danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit, die vielen Diskussionen und anregenden Gespräche. Den aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts danke ich für die fachliche und freundschaftliche Zusammenarbeit, die die viele Zeit am Institut in guter Erinnerung bleiben lässt. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Jan Roesler und Herrn Hannes Harms, die mich lange Zeit als wissenschaftliche Hilfskräfte bei der prototypischen Umsetzung der theoretischen Ansätze dieser Arbeit maßgeblich unterstützt haben.

Ein besonders großer Dank gilt meiner Frau Daniela sowie meiner Familie, die mich sowohl während meines Studiums, meiner Promotionszeit und auch darüber hinaus immer unterstützt haben. Vielen Dank meiner Frau und meiner Tochter Ellie für den Verzicht auf viele gemeinsame Stunden in letzter Zeit und dafür, mich auch nach vielen Stunden am Schreibtisch schnell wieder zum Lachen gebracht zu haben.

Braunschweig, im März 2020

Jan Schattenberg



*The two words 'information' and 'communication' are often used interchangeably, but they signify quite different things. Information is giving out; communication is getting through.*

**Sydney J. Harris**



## Kurzfassung

Bei der Automatisierung von Maschinenverbünden spielt der Datenaustausch eine entscheidende Rolle und muss vielfältigen Anforderungen in Hinblick auf Datenmenge, Robustheit, Verfügbarkeit etc. gerecht werden. Die Entwicklung der Technologien im Bereich Mobilfunk (3G, 4G, 5G) hat in den letzten Jahren dazu beigetragen, viele auf Daten basierende Applikationen und Dienste zu ermöglichen. Für die direkte Zusammenarbeit von Maschinen sind die derzeitigen Technologien allerdings auf Grund ihrer technischen Eigenschaften und vor allem der Verfügbarkeit weniger gut geeignet. Hier zeigen lokale und für den Augenblick geschaffene Funknetze Vorteile, da diese ohne zentrale Infrastruktur auskommen können und auf Grund der eigenen Bereitstellung verfügbar sind. Allerdings führt das Fehlen einer zentralen, koordinierenden Instanz zu anderen Herausforderungen.

Die vorliegende Arbeit greift dieses Thema auf und widmet sich der Frage, wie in einem mobilen Ad-hoc-Netz hochfrequent Daten zwischen mehreren Teilnehmern unter den Restriktionen ausgetauscht werden können, die dem folgenden Szenario geschuldet sind:

In einem Katastrophenfall soll ein Maschinenverbund aus mehreren kleinen Quadroptern und bodengebundenen Fahrzeugen ein Gebiet aufklären, ohne von externer Infrastruktur abhängig zu sein. Dabei soll er eine hohe Flexibilität sowohl bzgl. der Anzahl der Teilnehmer aufweisen als auch der, der hohen Mobilität geschuldeten, hochdynamischen Veränderung der Netztopologie. Zur Bestimmung der Position von z. B. Verunglückten oder zur Kartierung soll zudem eine relative Positionierung der Teilnehmer zueinander erfolgen, welche einen hochfrequenten Austausch aller Positionsrohdaten im Verbund erfordert.

Um die Frage zu beantworten, wird zunächst ein Überblick über die Grundlagen sowie den Stand der Technik und der Forschung gegeben. Anschließend wird basierend auf den konkreten Anforderungen eine Methode vorgestellt, die eine hochfrequente, dezentrale Ermittlung der Netztopologie ermöglicht. Diese dient als Basis für einen Austausch der Positionsrohdaten, der für die Relativpositionierung erforderlich ist. Der Austausch ist gleichsam dezentral organisiert, aber dennoch koordiniert.

Dieser taktbasierte und mittels der GNSS-Zeit synchronisierte Ansatz wird sowohl im Rahmen simulativer Untersuchungen für eine große Varianz an Netztopologien evaluiert als auch in praktischen Feldversuchen. Bei diesen Versuchen konnte ein erfolgreicher Datenaustausch in urbanen und auch in ruralen Szenarien realisiert werden.



# Abstract

Data exchange plays a decisive role in the automation of machine networks and must meet a wide range of requirements with regard to data volume, robustness, availability, etc. The development of mobile radio technologies (3G, 4G, 5G) in recent years has helped to enable many data-based applications and services. However, current technologies are less suitable for the direct cooperation of machines due to their technical properties and, above all, their availability. Local and for the moment created radio networks show advantages here, since these can get along without central infrastructure and are available due to the own provision. However, the lack of a central coordinating authority leads to other challenges.

The present work takes up this topic and addresses the question of how high-frequency data can be exchanged between several participants in a mobile ad-hoc network under the restrictions caused by the following scenario:

In a disaster scenario, a machine network of several small quadcopters and ground-based vehicles should explore an area without being dependent on external infrastructure and with a high flexibility regarding the number of participants and the highly dynamic change of the network topology due to the high mobility. In order to determine the position of, for example, casualties or for mapping, the participants should also be positioned relative to each other, which requires a high-frequency exchange of all raw position data in the network.

To answer this question, an overview of the basics and the state of the art of technology and research will be given. Then, based on the concrete requirements, a method is presented that enables a high-frequency, decentralized determination of the network topology. This serves as the basis for an exchange of raw position data, which is required for relative positioning. The exchange is organized and coordinated in a decentralized manner.

This clock-based approach, which is synchronized by means of GNSS time, is evaluated both within the framework of simulative investigations for a large variance of network topologies and in practical field trials. In these experiments a successful data exchange could be realized in urban as well as in rural scenarios.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungen und Begriffsdefinitionen.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Allgemeine Einführung zum Begriff Kommunikation .....	3
2.2 Referenzmodelle.....	7
2.3 Grundlagen der Ad-hoc-Netzwerke .....	10
2.3.1 Einordnung der Ad-hoc-Netze in vorhandene Funkstandards .....	11
2.3.2 Funktionsweise mobiler Ad-hoc-Netze (MANETs) .....	14
2.3.3 Routing in Ad-hoc-Netzen .....	19
2.3.4 Routing-Protokolle.....	21
2.4 Grundlagen der Satellitenortung .....	29
2.4.1 Allgemeine Einführung in die Satellitenortung .....	30
2.4.2 Funktionsweise Positionsbestimmung .....	31
2.4.3 Störeinflüsse.....	35
2.4.4 Korrekturmethode.....	38
2.5 Thematisch verwandte Forschungsprojekte .....	42
<b>3 Herleitung der Forschungsfrage .....</b>	<b>49</b>
3.1 Beschreibung des Szenarios .....	49
3.2 Anforderungen und Robustheit des Kommunikationssystems .....	52
3.3 Formulierung der Forschungsfrage .....	55
<b>4 Material und Methode .....</b>	<b>57</b>
4.1 Definition der Nutzdaten und der daraus resultierenden Anforderungen .....	57
4.2 Auswahl und Implementierung des Kommunikationsmoduls .....	61
4.3 Methodisches Vorgehen .....	68
<b>5 Theoretische Betrachtungen und simulative Untersuchungen .....</b>	<b>71</b>
5.1 Diskussion zur Einschränkung des Lösungsraums .....	71
5.2 Theoretische Betrachtungen zur Netzerkundung .....	73
5.3 Simulationsbasierte Untersuchung der Netzerkundung .....	87

---

5.3.1	Aufbau der Simulation zur Netzerkundung .....	87
5.3.2	Einfluss der Netzgrößen und Netztopologien .....	89
5.3.3	Einfluss von Nachrichtenverlusten .....	93
5.4	Simulationsbasierte Untersuchung des Nutzdatenaustauschs .....	98
5.4.1	Aufbau der Simulation zum Nutzdatenaustausch .....	98
5.4.2	Einfluss der Netztopologie auf den Datenaustausch .....	99
5.4.3	Einfluss des Datenvolumens .....	101
5.5	Diskussion der simulationsbasierten Untersuchung .....	105
<b>6</b>	<b>Prototypische Umsetzung .....</b>	<b>111</b>
6.1	Gesamtsystemkonzept .....	111
6.2	Softwareseitige Implementierung .....	112
6.2.1	Gesamtablauf Kommunikationssoftware .....	113
6.2.2	Rohdaten abrufen <i>GETRAW</i> .....	115
6.2.3	Synchronisierung und Zeitmessung .....	118
6.2.4	Netzerkundung <i>DISCOVER</i> .....	120
6.2.5	Ermittlung Datenaustausch <i>ROUTING</i> .....	122
6.2.6	Austausch der Nutzdaten <i>EXCHANGE</i> .....	126
6.3	Zeitliche Gesamtintegration .....	127
<b>7</b>	<b>Experimentelle Erprobung .....</b>	<b>131</b>
7.1	Versuchsgelände und Versuchsdurchführung .....	131
7.2	Software zur Versuchsdokumentation und Live-Analyse der Kommunikation ....	134
7.3	Versuchsauswertung .....	139
7.3.1	Direkte Auswertung Netzerkundung (Log-File XBee) .....	139
7.3.2	Indirekte Auswertung Schwarmpositionierung .....	153
<b>8</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Ausblick .....</b>	<b>155</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>159</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
<b>Anhang A</b>	<b>.....</b>	<b>170</b>

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
$c$	m/s	Lichtgeschwindigkeit
$d_{iono}$	m	Verzögerung durch Ionosphäre
$dt$	s	Satellitenuhrenoffset von der GPS-Zeit
$dT$	s	Empfängernuhrenoffset von der GPS-Zeit
$d_{trop}$	m	Verzögerung durch Troposphäre
$g$	$10^{-3}$ kg	Masse in Gramm
Hz	1/s	Hertz
l	m	Meter
$n$	-	Teilnehmerzahl
$N$	-	Mehrdeutigkeitsanteil
$P$	W	Watt
$PR$	m	Pseudorange
$t$	s	Zeit
$t_{TZ}$	ms	Taktzeit
$t_{\text{Üang}}$	ms	Angenäherte Übertragungszeit für Nachricht
$t_{\text{Ümess}}$	ms	Gemessene Übertragungszeit für Nachricht
$t_{\text{Ütheo}}$	ms	Theoretische Übertragungszeit für Nachricht
$U$	V	Spannung
$W$	%	Wahrscheinlichkeit
$\epsilon$	m	Empfängerrauschen (Restfehler)
$\rho$	m	Geometrische Entfernung Sender – Empfänger (GNSS)
$\Phi$	m	Trägerphase

---

Zeichen	Einheit	Größe
$\Delta t$	s	Uhrenoffset
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\varphi$	rad	Phasenwinkel
$x_{sv}, y_{sv}, z_{sv}$	m	Position des Satelliten aus den Ephemeriden
$x_u, y_u, z_u$	m	Position des Empfängers

## Abkürzungen und Begriffsdefinitionen

Abkürzung	Bedeutung
ACK	Acknowledgement (Bestätigung des Empfangs eines Datenpaketes)
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
API	Application programming interface
ARTIS	Autonomous Rotorcraft Testbed for Intelligent Systems (Modellhubschrauber des DLR FT-ULF)
Bit	Binary digit
BSS	Basic Service Set
C/A-Code	Coarse/Acquisition Code
CA	Collision Avoidance
CAN	Controller Area Network
CD	Collision Detection
CDMA	Code Division Multiple Access
comRoBS	Communication Mobile Robots Braunschweig
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTS	Conventional Terrestrial System (oder siehe RTS/CTS)
D-GLONASS	Differential GLONASS
DGPS	Differential Global Positioning System
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector Routing
DSR	Dynamic Source Routing
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
GLONASS	Globalnaya nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
GPRS	General Packet Radio Services (dt.: Allgemeiner paketorientierter Funkdienst)
GPS	Global Positioning System (offiziell NAVSTAR GPS)
ID	Identity / Identifikationsnummer
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFF	Institut für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig
INS	Inertial Navigation System (Trägheits-Navigationssystem)
IP	Internet Protocol
ISM-Band	Industrial, Scientific and Medical Band
LTE	Long Term Evolution
MANET	Mobile Ad hoc Network
Max.	Maximalwert Taktzahl
Max.95%	Taktzahl unterhalb welcher sich 95% der Simulationsergebnisse befinden
MW	Mittelwert
NT	Netzgröße
Ntrip	Networked Transport of RTCM via Internet
OCB	Outside the Context of a BSS
OLSR	Optimized Link State Routing
OSI-Modell	Open Systems Interconnection Model
P- bzw. P/Y-Code	Precise/Encrypted-Code
PC	Personal Computer
PPS	Pulse per Second
PRN	Pseudo Random Noise (dient zur eindeutigen Signalkodierung)
RF	Radio Frequency

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
RREP	Route Reply Paket
RREQ	Route Request Paket
RRER	Route Error Paket
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
RTS/CTS	Request To Send/Clear To Send
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SPI	Serial Peripheral Interface
TAI	Temps Atomique International
TCP	Transmission Control Protocol
TTL	Transistor-Transistor-Logic
TWI	Two-wire Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Erklärung siehe Begriffsdefinitionen)
UDP	User Datagram Protocol
UGV	Unmanned Ground Vehicle (Erklärung siehe Begriffsdefinitionen)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UT(1)/(2)	Universal Time (1/2 bezeichnen Zeitkorrekturen)
UTC	Universal Time, Coordinated
UWB	Ultra-wideband (deutsch: Ultrabreitband)
UXV	Unmanned Aerial/Ground Vehicle
WAAS	Wide Area Augmentation System
WLAN	Wireless Local Area Network



**Abkürzung      Bedeutung**

---

WPAN              Wireless Personal Area Network

WWAN            Wireless Wide Area Network

ZRP                Zone Routing Protocol

**Begriffsdefinitionen****Begriff                      Definition**

---

Ad-hoc-Netz              Ein Ad-hoc-Netz ist ein i. d. R. funkbasiertes Kommunikationsnetz bestehend aus mindestens zwei Teilnehmern, das sich ohne Benutzereingriff spontan bildet, sobald sich die Teilnehmer in gegenseitiger Reichweite befinden.

Bandbreite                Als Bandbreite wird der Frequenzbereich bezeichnet, in dem die dominanten Frequenzen eines Signals übertragen werden. Bei analogen Signalen entspricht die Bandbreite der Daten- bzw. Datenübertragungsrate.

Broadcast                Übertragung von Daten von einem Sender an alle Teilnehmer eines Kommunikationsnetzes ohne Verwendung von eindeutigen Adressen. Ermöglicht Versendung von Daten bei unbekannten Kommunikationsteilnehmern. Es erfolgt keine Rückantwort der Empfänger an den Sender.

Datenübertragungsrate  
/Datenrate                Datenübertragungsrate oder auch Datenrate bezeichnet die Menge an digitalen Daten, die innerhalb einer bestimmten Zeit auf einem Übertragungskanal übertragen werden können. Bei einer Codierung von einem Bit pro Hertz entspricht sie der Bandbreite.

Ephemeriden            Ephemeriden sind Tabellen, die die Position von sich bewegenden astronomischen Objekten in konstanten Zeitabständen enthalten. Dazu zählen z.B. auch Satellitenbahnen etc., welche zur Bestimmung der Position bei Satellitennavigationssystemen notwendig sind.

<b>Begriff</b>	<b>Definition</b>
Kanten	Kanten bezeichnen in der Graphentheorie die Verbindung zweier Knoten. Sind zwei Knoten mit einer Kante verbunden sind sie benachbart.
Knoten	Als Knoten werden in Netzwerken im Allgemeinen alle Verbindungspunkte bzw. Elemente bezeichnet, die mittels Verbindungen, auch als Kanten bezeichnet, miteinander verbunden sind.
Latenzzeit	Als Latenzzeit wird der Zeitraum bezeichnet, der zwischen einer Aktion und einer Reaktion vergeht. Im Bereich der Kommunikation wird es als Maß für die Bearbeitungszeit bzw. Verarbeitungszeit verwendet.
Mobile Maschinen	„Mobile Arbeitsmaschinen sind Arbeitsmaschinen, die nicht stationär arbeiten, also deren Einsatzort durch eigenen oder fremden Antrieb gewechselt werden kann und deren Energieversorgung ebenfalls nicht stationär ist. Mobile Arbeitsmaschinen sind ferner Fahrzeuge, zu deren Aufgaben neben der reinen Fahrt die Verrichtung von Arbeitsprozessen zählt.“ ([Lang02], S. 17)
Mobiles Ad-hoc-Netz	Eine spezielle Form der Ad-hoc-Netze, bei der sich die Teilnehmer in Bewegung befinden und es somit zu häufigen Veränderungen der Topologie kommt. Im Englischen auch als MANET bezeichnet.
Multicast	Gleichzeitige Übertragung von Daten von einem Sender an eine Auswahl von Teilnehmern eines Kommunikationsnetzes.
Netzwerk bzw. Netz	Ein Netzwerk bezeichnet ein System aus Knoten, die über Kanten miteinander verbunden sind.
Ortung	Aktives Verfahren zur Bestimmung des Ortes und seiner Entfernung zum Beobachter eines Objektes unter Verwendung von Signalen, die von dem zu ortenden Objekt an den Aussender der Signale zurückgelangen.

<b>Begriff</b>	<b>Definition</b>
Positionierung	Bezeichnet das Einnehmen einer konkreten räumlichen Positionsangabe durch ein Objekt in Verbindung mit der Orientierung oder Ausrichtung des Objektes
Routing / Router	Bezeichnet den Prozess der Auswahl der richtigen Schnittstelle und des nächsten Schrittes für die Übermittlung eines Datenpaketes auf dem Weg zum Empfänger (vgl. [Malk13]). Die dazugehörige technische Einrichtung wird als Router bezeichnet.
Schwarmpositionierung	Scharmpositionierung bezeichnet die Bestimmung der Position aller in einem Verbund befindlichen Einheiten absolut und relativ zueinander, wobei hierzu alle Ego-positionen im Verbund ausgetauscht und zur Berechnung herangezogen werden.
Sendeleistung	Bezeichnet in Watt oder dBm die Leistung, die ein Sender aufbringt. Diese bezieht sich auf die von der Endstufe abgegebene Leistung oder auf die abgestrahlte Leistung einer Antenne.
TriPos	Hier: Navigationsframework entwickelt vom Institut für Flugführung der TU Braunschweig
UAV	Ein UAV ist ein unbemanntes Luftfahrzeug (engl. Unmanned Aerial Vehicle). In dieser Arbeit dient es als Bezeichnung für einen ferngesteuerten Quadrocopter der Firma Ascending Technologies, der als Versuchsträger eingesetzt wurde [Asce14].
UGV	In Anlehnung an UAV bezeichnet ein UGV ein unbemanntes Bodenfahrzeug (engl. Unmanned Ground Vehicle). Hier: bodengebundener, mobiler Versuchsträger comRoBS ( <b>co</b> operating <b>m</b> obile <b>R</b> obots <b>B</b> raun <b>S</b> chweig).
Unicast	Übertragung von Daten von einem Sender an genau einen Empfänger unter Verwendung der eindeutigen Adresse des Zieles.

# 1 Einleitung

Der Austausch von Daten jeglicher Art zur Zusammenarbeit von Maschinen, ob teil- oder vollautomatisiert, hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen und wird mit der zunehmenden Autonomisierung weiter an Relevanz gewinnen. Für viele Anwendungen, die z. B. nicht zur direkten Steuerung von Maschinen dienen und bei welchen somit kein Bedarf an einen Datenaustausch in Echtzeit besteht, sind Infrastrukturnetze wie z. B. das Mobilfunknetz mit den Mobilfunkstandards 2G, 3G und 4G gut geeignet. Für echtzeitkritische Anwendungen und in Gebieten ohne verfügbaren Mobilfunk müssen eigene Kommunikationsstrukturen geschaffen werden, die die besonderen Anforderungen der Anwendung berücksichtigen. Der gerade in der Einführung befindliche Mobilfunkstandard 5G wird laut den Spezifikationen auch für echtzeitkritische Anwendungen geeignet sein, benötigt aber auch die entsprechende Infrastruktur, um eine verlässliche Verfügbarkeit zu bieten. Für Automatisierungsanwendungen ist die Interpretation diverser, die Umgebung erfassender Sensordaten jedes einzelnen Teilnehmers häufig erforderlich. Die Kenntnis über die Position der anderen Teilnehmer ist jedoch für eine zielgerichtete Zusammenarbeit meist sogar zwingend erforderlich. Dieses kann entweder über die gegenseitige Erfassung der Position, basierend auf relativer Sensortechnik, wie z. B. Kameras, Laserscannern, etc. erfolgen, oder über den Austausch absoluter Positionsinformationen.

Unterschiedliche Einsatzszenarien, verschiedene Trägerfahrzeuge und auch die Anzahl der beteiligten Teilnehmer definieren dabei eine Vielzahl unterschiedlicher und sehr spezieller Anforderungsprofile an die Kommunikation. Während bei großen komplexen Arbeitsmaschinen, wie z. B. im Bereich der Baumaschinen oder der Landtechnik, der Energieverbrauch, die Baugröße und zum Teil auch die Kosten der Systeme nur eine eher untergeordnete Rolle spielen, sind diese bei kleinen fliegenden und auch bodengebundenen Einheiten von zentraler Bedeutung. Dieser breite Fächer an spezialisierten Nischenanwendungen erfordert somit auch sehr individuelle Lösungskonzepte für den Datenaustausch, weswegen sich viele Projekte mit auf den ersten Blick ähnlichen, aber bei genauerer Betrachtung doch unterschiedlichen Fragestellungen im Bereich des Datenaustauschs beschäftigen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zum Datenaustausch von GNSS-Rohdaten und Statusinformationen in einem Verbund von mobilen boden- und luftoperierenden Einheiten unter Nutzung eines mobilen Ad-hoc-Netzes vorgestellt. Die konkrete Nutzung ist in diesem Fall die kooperative Ortung, die im Folgenden als Schwarmpositionierung bezeichnet wird. Dazu erfolgt zunächst eine Darstellung der Grundlagen und des Stands der Technik und der Forschung mit einer allgemeinen Einleitung zur Kommunikation, um an einem plakativen Beispiel die Herausforderungen aufzuzeigen.

Anschließend werden die technischen Grundlagen des Datenaustauschs sowie der Ortung behandelt. Ein folgender Überblick über laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte ordnet diese Arbeit in den Kontext anderer Aktivitäten im Bereich mobiler Maschinen, Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge ein.

Im dritten Kapitel wird die Forschungsfrage dieser Arbeit hergeleitet. Dazu wird zunächst das Szenario beschrieben und auf die Anforderungen an den Datenaustausch analysiert. Ergänzt wird dieses durch die Betrachtung der Anforderungen hinsichtlich der Robustheit, bevor die sich daraus ergebende Forschungsfrage formuliert wird. Im vierten Kapitel werden die Nutzdaten analysiert und definiert. Anschließend wird auf die Auswahl und Implementierung der Kommunikationsmodule eingegangen, die als Basis für die praktischen Versuche dienen. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Darstellung der methodischen Vorgehensweise, die dieser Arbeit zu Grunde liegt.

Theoretische Betrachtungen und simulative Untersuchungen bilden im anschließenden fünften Kapitel den Kern dieser Arbeit. Zunächst wird der Lösungsraum zur Beantwortung der Forschungsfrage diskutiert und im Abgleich mit den Grundlagen und weiteren Randbedingungen soweit eingeschränkt, dass die Beantwortung der Frage zielgerichtet und methodisch erfolgen kann. Basierend auf theoretischen Betrachtungen wird im Anschluss ein Konzept zur Netzerkundung entwickelt, bevor dieses im Abgleich mit den technischen Eigenschaften der grundsätzlich geeignet erscheinenden Kommunikationshardware in experimentellen Untersuchungen überprüft wird. Die weitere Überprüfung des Ansatzes erfolgt basierend auf einer Simulation und differenziert zwischen der Netzerkundung und dem anschließenden Datenaustausch. Betrachtet werden hierbei vor allem der Einfluss der Netzgröße und der Netztopologie sowie die Robustheit gegenüber Störungen. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der simulationsbasierten Ergebnisse als Zwischenfazit.

Das sechste Kapitel beinhaltet die Beschreibung der prototypischen Umsetzung, wobei der Fokus auf der softwareseitigen Implementierung des Konzepts liegt. Dazu werden anhand von Flussdiagrammen die wesentlichen Abläufe und die zeitliche Gesamtintegration vorgestellt. Die Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Erprobung erfolgt im siebten Kapitel. Hierzu werden zunächst die Art der Versuchsdurchführung und die Versuchsgelände vorgestellt sowie die für die Analyse und Betrachtung der Kommunikation entwickelte Software. Die Versuchsauswertung gliedert sich in eine direkte Auswertung der Netzerkundung und eine indirekte Auswertung für den darauf basierenden Datenaustausch für die Schwarmpositionierung. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse und einem Ausblick im achten Kapitel und einer Zusammenfassung im Kapitel Neun.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik und Forschung

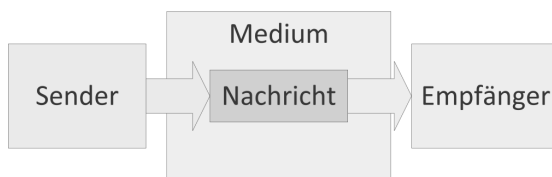
In diesem Kapitel werden sowohl die erforderlichen Grundlagen als auch der Stand der Technik und Forschung für die Themenbereiche dokumentiert, die im direkten Zusammenhang mit den dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellungen stehen. Dazu wird zunächst einleitend auf den Begriff der Kommunikation im allgemeinen Sinne eingegangen, um an die Problemstellung des Datenaustauschs, als Teilbereich der Kommunikation, heranzuführen. Anschließend erfolgen eine nähere Betrachtung der relevanten Grundlagen und ein Einblick in aktuelle Forschungsaktivitäten, in denen der Datenaustausch eine wesentliche Rolle spielt, bevor im folgenden Kapitel auf das konkrete Szenario und die damit verbundenen Anforderungen eingegangen wird.

### 2.1 Allgemeine Einführung zum Begriff Kommunikation

Nach allgemeinem Sprachgebrauch und Verständnis ist Kommunikation (nicht technisch betrachtet) der Austausch oder auch die Übertragung von Informationen, wobei Informationen als Sammelbegriff für Wissen, Erkenntnis oder Erfahrung steht und Austausch ein gegenseitiges Geben und Nehmen bezeichnet. Der Begriff Übertragung wiederum steht für die Überwindung einer Distanz, also dafür, dass die Information ein Individuum verlässt und bei einem anderen Individuum ankommt [GrDi92], [Köt02], [Spr15]. Zudem erfolgt Kommunikation neben der verbalen Form auch ebenso in einer nonverbalen Form, wozu bei der menschlichen Kommunikation u.a. die Mimik und Gestik zählen. WATZLAWICK ET AL. [WaBJ96] definierten Kommunikation in ihrer Bedeutung als Sozialhandlung. Mittlerweile wird der Begriff Kommunikation mit dem voranschreitenden Einsatz von Kommunikationstechnologien auch anderweitig verwendet. So steht Kommunikation im technischen Sinne ebenso für die Signalübertragung, also den Informationsaustausch zwischen Maschinen und Geräten, wie auch für erweiterte Interaktionen z. B. der wechselseitigen Steuerung. Der im Titel dieser Arbeit verwendete Begriff *Datenaustausch* ist in diesem Zusammenhang als der reine Informationsaustausch zwischen Maschinen und Geräten zu verstehen.

Für die klassische Form der Kommunikation, aber ebenso für die erweiterte Verwendung im Bereich der Technik, sind ergänzend zur eingangs erfolgten Definition einige grundlegende Begrifflichkeiten zu erläutern, auf die im weiteren Verlauf dieser Arbeit Bezug genommen wird. Bild 2.1 zeigt ein vereinfachtes allgemeines Kommunikationsmodell bestehend aus einem Sender, dem Medium zur Übertragung der Nachricht und dem Empfänger. Beim Medium kann es sich um Sprache handeln, aber auch um elektronische Medien. Die

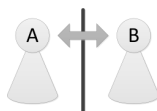
Nachricht besteht aus Wörtern oder informationstechnisch gesehen äquivalent aus Bits und Bytes. Wichtig für die Kommunikation ist, dass sowohl Sender als auch Empfänger das gleiche Medium „verstehen“ und der Inhalt der Nachricht somit entsprechend auf der Seite des Senders für das Medium kodiert und auf der Seite des Empfängers dekodiert werden kann.



**Bild 2.1:** Einfachstes Kommunikationsmodell

Auf den ersten Blick erscheint Kommunikation etwas zu sein, was selbstverständlich, alltäglich und quasi ohne besonderes Zutun abläuft. So schreiben WATZLAWICK ET AL. „Man kann nicht *nicht* kommunizieren.“ ([WaBJ96], S. 53), wobei nicht nach erfolgreicher und nicht erfolgreicher Kommunikation unterschieden wird. Erst bei genauerer Betrachtung und Auseinandersetzung mit dem Thema werden die speziellen Herausforderungen erkenntlich, die spezielle Lösungen erfordern. Auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten speziellen technischen Herausforderungen wird in Kapitel 3.3 eingegangen, wobei an dieser Stelle das Bewusstsein für die Randbedingungen einer erfolgreichen Kommunikation für das spätere Verständnis an Hand von plakativen Beispielen geschaffen werden soll. Dazu werden nachfolgend in vier Szenarien typische Alltagssituationen dargestellt und auf, für die Kommunikation, entscheidende - aber nicht unbedingt offensichtliche - Aspekte eingegangen. Hierzu werden Situationen aus der menschlichen Kommunikation herangezogen, da diese auch ohne technisches Hintergrundwissen zugänglich und geläufig sind.

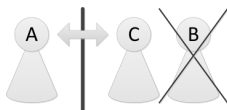
Im in Bild 2.2 dargestellten **ersten Szenario** telefonieren zwei sich bekannte Menschen miteinander. Person A (A) ruft Person B (B) an. B meldet sich mit seinem Namen, worauf A ebenfalls seinen Namen nennt, B begrüßt A und beginnt direkt ein Gespräch. A und B kommunizieren miteinander und tauschen Informationen in Form eines Dialoges aus.



**Bild 2.2:** Szenario 1 – Ferngespräch zwischen zwei sich bekannten Personen

*A und B kennen sich, der reine Austausch des Namens liefert weitere Hintergrundinformationen, die für die Kommunikation relevant sein könnten (Sprachverständnis, Vorwissen, weitere Kontakte, ...). Gelernte Regeln – man meldet sich am Telefon mit Namen – helfen, die Kommunikation geordnet durchzuführen. Die Kenntnis über Grammatik, Satzbau etc. wie auch die Interpretation der Inhalte ermöglichen es sowohl A als auch B zu erkennen, zu welchen Zeitpunkten sie sprechen und zu welchen Zeitpunkten sie zuhören müssen. Informationen werden effektiv ausgetauscht und der Informationsschatz bei A und B steigt an.*

Im **zweiten Szenario** (Bild 2.3) möchte die aus Szenario 1 bekannte Person A (A) Person B (B) anrufen. Es meldet sich allerdings eine unbekannte Person C (C) am Telefon in einer anderen Sprache. A begrüßt C knapp und fragt nach B.

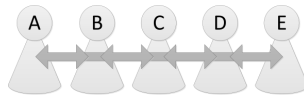


**Bild 2.3:** Szenario 2 – Ferngespräch zwischen zwei sich nicht bekannten Personen

*A und C kennen sich NICHT, sodass der reine Austausch des Namens keine weiteren Hintergrundinformationen liefert. Die Kommunikation kann nicht in - aus Sicht von A - gewohnter Weise erfolgen. Im Gegensatz zu Szenario 1 liegen nicht die gleichen Sprachkenntnisse etc. vor und es gibt kein gemeinsames Vorwissen, auf das zurückgegriffen werden kann. Dieses einfache Szenario soll bewusst machen, dass schon eine kleine Veränderung dazu führen kann, dass die Kommunikation gestört ist. A und C müssen zunächst eine gemeinsame Basis für eine Kommunikation finden. Der Austausch der relevanten Informationen wird zudem dadurch ineffektiv, dass A und C keine wechselseitige Kenntnis darüber besitzen, welches Vorwissen vorhanden ist und ggf. Informationen wiederholen müssen. Auch müssen A und C zunächst Informationen darüber austauschen, in welchem Verhältnis sie zu B stehen, um ggf. Informationen an diese Person weiterleiten zu können.*

Das **dritte Szenario** beschreibt die Situation bei einem geplanten Treffen eines Personenkreises bestehend aus fünf Personen (A, B, C, D und E) zu dem A eingeladen hat und es liegt allen eine Agenda für das Treffen vor (Bild 2.4).

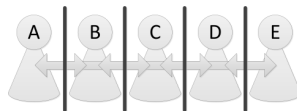




**Bild 2.4:** Szenario 3 – Direktes Gespräch mit Moderator

*A eröffnet das Gespräch und begrüßt alle. Er fordert B auf sich kurz vorzustellen, B übergibt das Wort an C usw. Anschließend soll eine Diskussion geführt werden. A übernimmt die Rolle des Moderators. Durch Blickkontakt (nonverbale Kommunikation) signalisieren die Beteiligten das Wort erteilt zu bekommen. A erteilt das Wort und es läuft eine geordnete Diskussion. Ein moderiertes oder auch koordiniertes Gespräch verläuft geordnet. Es treten keine Informationsverluste auf, da alle Beteiligten nacheinander sprechen. Gibt es nur ein begrenztes Zeitfenster, übernimmt der Moderator die Überwachung der Redezeitfenster.*

**Szenario 4** beschreibt die Situation einer geplanten Telefonkonferenz des gleichen Personenkreises aus Szenario 3. A leitet die Telefonkonferenz ein.



**Bild 2.5:** Szenario 4 – Ferngespräch ohne Moderator

*A ruft nach und nach die einzelnen Personen an und bindet sie in die Telefonkonferenz ein. Da die Personen nicht über andere Kommunikationsformen sehen können, wer schon da ist, muss alles verbal erfolgen. Die Hinzugekommenen werden von allen begrüßt, wobei sich die Personen gegenseitig ins Wort fallen. Sie zögern, warten ab, versuchen erneut das Wort zu ergreifen. Auch der Moderator A kann seine Funktion nur begrenzt durchführen, da ihm weitere Medien zur Kommunikation nicht zur Verfügung stehen.*

Diese vier einfachen jedem aus der eigenen Erfahrung heraus verständlichen Szenarien zeigen auf, wie kompliziert Kommunikation sein kann und mit welchen Mitteln die Herausforderungen der Kommunikation im Alltag gelöst werden. Dieses auf technische Fragestellungen zu übertragen, bedeutet vor allem für viele Situationen Regeln zu entwickeln, die in der menschlichen Kommunikation häufig intuitiv zum Tragen kommen, aber auch vielen, auf unterschiedlichen Ebenen (gesellschaftlich, kulturell, etc.) vorhandenen, Regeln unterliegen.

## 2.2 Referenzmodelle

Um für die technische Kommunikation Regeln zu standardisieren, wurde seit dem Ende der 70er Jahre an einem Vorschlag für ein Referenzmodell gearbeitet, das von DAY UND ZIMMERMANN 1983 [DaZi83] vorgestellt und 1984 von der *International Organization for Standardization* (ISO) als ISO-OSI-Modell (engl. Open System Interconnection Model) veröffentlicht wurde. Wie unter anderem von TANENBAUM (vgl. folgender Abschnitt [Tane03]) beschrieben, behandelt es die Verbindung offener Systeme. Das Referenzmodell beschreibt in sieben Schichten, welche Aufgaben von weiteren Diensten und Protokollen übernommen werden müssen, wobei diese in weiteren internationalen Standards veröffentlicht wurden. Das OSI-Modell selbst ist somit keine Netzarchitektur im eigentlichen Sinne, sondern dient nur als Rahmen. Nachfolgend erfolgen eine tabellarische Aufstellung der Schichten und eine kurze Beschreibung dieser, auf die im späteren Verlauf dieser Arbeit, zur Beschreibung der eigenen Untersuchungen, noch Bezug genommen wird bzw. als Grundlagenwissen dient.

**Tabelle 2.1:** Die Schichten des OSI-Referenzmodells ([Tane03], S. 54–58)

OSI-Schicht		Kurzbeschreibung
7	Anwendung (Application Layer)	Die Anwendungsschicht enthält die Dateneingabe und Datenausgabe sowie die dafür benötigten Protokolle. Zu den bekanntesten Protokollen zählt das <i>Hyper Text Transfer Protocol</i> (HTTP), als Basis für das World Wide Web. Andere bekannte Protokolle sind z. B. FTP (File Transfer Protocol) zur Dateiübertragung oder SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) zur Übermittlung von E-Mails.
6	Darstellung (Presentation Layer)	Die Darstellungsebene übersetzt verschiedene systemabhängige Datendarstellungsformen in eine Standardkodierung, die zur Datenübertragung genutzt wird. Somit ermöglicht sie den Austausch von Datenstrukturen auf höheren Ebenen.
5	Sitzung (Session Layer)	Die Sitzungsschicht ist dafür zuständig, Sitzungen (Verbindungen) zwischen zwei verschiedenen Endgeräten aufzubauen, bei denen verschiedene Dienste zum Einsatz kommen. Am relevantesten ist zumeist die Synchronisation, bei der bei langen Übertragungen sogenannte Fixpunkte gesetzt werden, ab denen eine Übertragung bei einem Absturz der Verbindung wieder aufgenommen wird.

OSI-Schicht	Kurzbeschreibung
4 Transport (Transport Layer)	<p>Die Transportschicht hat zur Aufgabe die Daten von der Sitzungsschicht zu übernehmen, diese zu segmentieren, sie an die Vermittlungsschicht zu übergeben und sicherzustellen, dass alle Teile richtig am anderen Ende ankommen. Diese Schicht dient auch dazu, Hardwareabhängigkeiten von den oberen Schichten abzuhalten und stellt den Übergang von einer Punkt-zu-Punkt Übertragung zwischen einem Rechner und den unmittelbaren Nachbarn zu einer Endpunkt-zu-Endpunkt Übertragung von der Quelle zum Ziel dar.</p> <p>(Bekannte Beispiele: TCP, UDP)</p>
3 Vermittlung (Network Layer)	<p>Die Vermittlungsschicht steuert den Betrieb des Verbindungsnetzes und somit bei paketorientierten Übermittlungen die Paketrouten, auch als Routing bezeichnet, die entweder auf statischen Tabellen beruhen oder dynamisch bis hochdynamisch zur optimalen Netzauslastung ermittelt werden. Somit ist eine Aufgabe der Vermittlungsschicht auch der Aufbau und die Aktualisierung der Routing-Tabellen. Darüber hinaus ist die Schicht allgemein auch verantwortlich für die Qualität des bereitgestellten Netzes.</p> <p>(Bekannte Beispiele: IP, IPsec)</p>
2 Sicherung (Data Link Layer)	<p>Die Sicherungsschicht regelt den Zugriff auf die Übertragungseinrichtung und sorgt für eine Übertragung frei von unbekannten Fehlern. Dazu werden die Daten in Datenrahmen (<i>Data Frames</i>) zerlegt, sequentiell verschickt und bei Erfolg vom Empfänger mittels Bestätigungsrahmen (<i>Acknowledgement Frame</i>) bestätigt. Darüber hinaus sind hier häufig die Flusskontrolle und die Fehlerbehandlung integriert sowie als spezielle Zwischenschicht die MAC-Teilschicht (<i>Medium Access Control</i>) zur Zugriffssteuerung.</p> <p>(Bekanntes Beispiel: IEEE 802.11)</p>
1 Bitübertragung (Physical Layer)	<p>Die Bitübertragungsschicht beschreibt die physikalische Ebene im OSI-Modell und die Übertragung von einzelnen Bits über den Kommunikationskanal sowie die dafür notwendigen mechanischen und elektrischen Eigenschaften.</p> <p>(Bekannte Beispiele: RS 232, RS 422)</p>

Neben dem vielfach als Grundlage verwendeten OSI-Referenzmodell, das vor allem bei Netzprotokollen Verwendung findet und in erster Linie für große Netze eine Rolle spielt, wurde mit der Entstehung des Urahns des weltweiten Internets, dem *Advanced Research Projects Agency Network* (ARPA-Net), das TCP/IP-Referenzmodell entwickelt. Im Gegensatz zum OSI-Referenzmodell berücksichtigt dieses speziell den Zusammenschluss verschiedener Netze und ist somit der rasanten Entstehung unterschiedlichster Netze angepasst, die zur Entstehung des OSI-Referenzmodells noch nicht abzusehen war. Es ähnelt im Aufbau dem OSI-Referenzmodell mit den Schichten und Stapeln unabhängiger Protokolle. Allerdings besitzt es weniger Schichten. Verzichtet wird auf die Darstellungsschicht (OSI-Schicht 6) und die Sitzungsschicht (OSI-Schicht 5). Gemeinsam sind die Anwendungs- und Transportschicht. Der Vermittlungsschicht im OSI-Referenzmodell entspricht die Internet-Schicht im TCP/IP-Referenzmodell, da diese im Grunde die gleichen Aufgaben des Routings und der Überlastvermeidung übernimmt. Die unteren beiden Schichten des OSI-Referenzmodells werden nicht berücksichtigt. Bild 2.6 zeigt die beschriebenen Unterschiede und Gemeinsamkeiten in einer Gegenüberstellung.

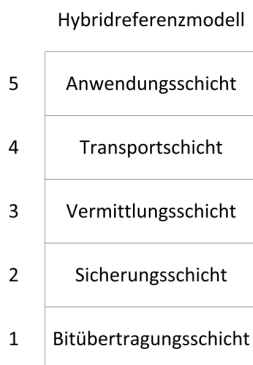
	OSI	TCP/IP
7	Anwendung	Anwendung
6	Darstellung	
5	Sitzung	
4	Transport	Transport
3	Vermittlung	Internet
2	Sicherung	Host-zu-Netz
1	Bitübertragung	

**Bild 2.6:** Vergleich des OSI- und TCP/IP- Referenzmodells ([Tane03], S. 60)

Wesentlich ist vor allem der Inhalt der Schichten. Im TCP/IP-Referenzmodell werden in der Transportschicht zwei wichtige Endpunkt-zu-Endpunkt-Übertragungsprotokolle definiert. Das eine ist das *Transmission Control Protocol* (TCP), bei dem es sich um ein verbindungsorientiertes Protokoll handelt. Dieses zerlegt den zu sendenden Bytestrom in einzelne Nachrichten, übergibt diese an die Internetschicht und setzt diese auf der

Empfängerseite wieder zusammen. Das zweite ist das *User Datagram Protocol* (UDP). Bei diesem handelt es sich um ein verbindungsloses Protokoll. Es besitzt im Gegensatz zu TCP keine Flusskontrolle, die die Reihenfolge der Datenpakete sicherstellt. Durch Verzicht auf Sicherungsfunktionen ermöglicht dieses Protokoll eine schnelle Übertragung von Daten und findet somit vor allem bei Client/Server Strukturen Anwendung, bei denen große Datenmengen bei geringen Sicherheitsanforderungen übertragen werden müssen.

Nach TANENBAUM lässt sich zudem zusammenfassend sagen, dass beide Referenzmodelle Mängel aufweisen. Das OSI-Modell selbst ist sehr gut geeignet zur Beschreibung von Rechnernetzen, die Protokolle hingegen sind eher ungeeignet. Beim TCP/IP Modell wiederum sind die implementierten und entstandenen Protokolle sehr gut anwendbar, jedoch findet das TCP/IP-Modell zur Beschreibung von Rechnernetzwerken so gut wie keine Anwendung. Eine Kombination aus beiden Modellen wurde deshalb in [Tane03] als Hybridmodell zur Verwendung vorgeschlagen, welches die Vorteile beider Modelle nutzt und somit am praktikabelsten ist. Es nutzt, mit den Schichten für die Bitübertragung, die Sicherung und die Vermittlung, die unteren drei Schichten des OSI-Modells, die in beiden Modellen vorkommende Transportschicht sowie eine Anwendungsschicht (vgl. Bild 2.7).



**Bild 2.7:** Hybridreferenzmodell basierend auf Vorteilen des OSI und TCP/IP Modells ([Tane03], S. 67)

## 2.3 Grundlagen der Ad-hoc-Netzwerke

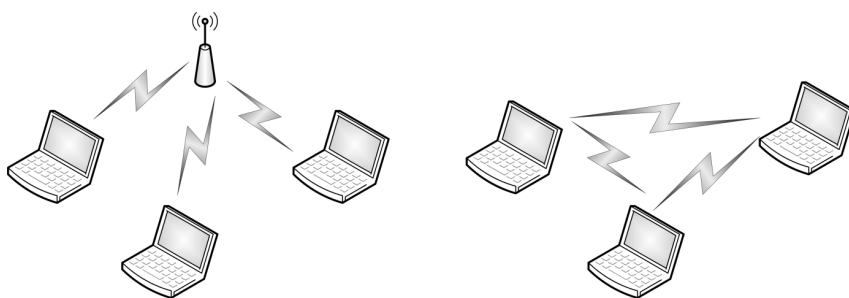
Der folgende Abschnitt basiert vor allem auf Werken von TANENBAUM [Tane03], SCHILLER [Schi03] und GARG [Garg07], die auf unterschiedliche Weise die grundlegenden Eigenschaften von Computernetzwerken und speziell von drahtlosen Netzen beschreiben. Da

die dieser Arbeit zu Grunde liegende Frage- bzw. Aufgabenstellung schon im Vorhinein die Verwendung eines drahtlosen Ad-hoc-Netzes erfordert, wird aus Gründen des Umfangs auf die Wiedergabe sämtlicher grundlegender Eigenschaften von Computernetzwerken verzichtet. Dafür auf die genannten Werke verwiesen und der Fokus auf die Beschreibung der speziellen Eigenschaften von drahtlosen Netzen und im Speziellen von Ad-hoc-Netzen gelegt. Zunächst werden Ad-hoc-Netze in den Kontext der allgemein vorhandenen Funkstandards gestellt. Anschließend erfolgt ein kurzer Abriss über die wichtigsten Eigenschaften und Funktionen, bevor auf das Routing im Allgemeinen und ausgewählte Routingalgorithmen im Speziellen eingegangen wird.

### 2.3.1 Einordnung der Ad-hoc-Netze in vorhandene Funkstandards

Ad-hoc-Netze finden in der Regel dann Anwendung, wenn spontan eine Verbindung für den kurzen Austausch von Informationen aufzubauen ist. Der Bedarf für Ad-hoc-Netze ist vor allem dem steigenden Aufkommen von mobilen Endgeräten (Notebooks, PDAs, Smartphones etc.) und dem Bedarf, diese ohne weitere Infrastruktur zu vernetzen, zuzurechnen. Die Bezeichnung „Ad-hoc“ leitet sich vom lateinischen Ausdruck *ad hoc*, welcher dem Sinn nach mit „für den Augenblick gemacht“ zu übersetzen ist (Lateinisch „zu diesem, hierfür“), ab.

Ad-hoc-Netze als eine Untergruppe der drahtlosen Netze unterscheiden sich insofern von klassischen Netzen, auch als Infrastrukturnetze bezeichnet, dass sie keine feste Infrastruktur zum Aufbau und zur Erhaltung von Verbindungen besitzen. Beispiele für typische Konstellationen beider Netztypen zeigt Bild 2.8.

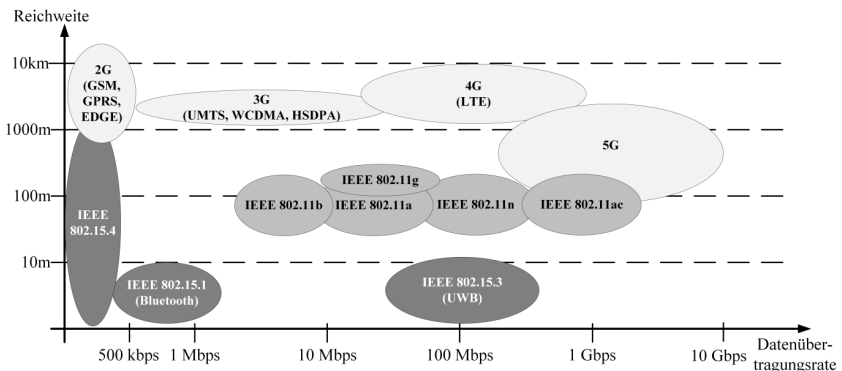


**Bild 2.8:** Prinzipdarstellung Infrastruktur- (links) und Ad-hoc-Netz (rechts) ([Tane03], S. 87)

Die linke Bildhälfte zeigt ein beispielhaftes Infrastrukturnetz mit drei mobilen Endgeräten und einer Basisstation, die auch als Zugriffspunkt (Access Point) bezeichnet wird. Die Kommunikation wird in diesem Fall vollständig über und vor allem durch die Basisstation

geleitet. Häufig repräsentiert die Basisstation oder der Access Point auch die Schnittstelle zu einem übergeordneten Netz, z. B. einem Telekommunikationsnetz. Die rechte Bildhälfte zeigt hingegen ein einfaches Ad-hoc-Netz mit ebenfalls drei mobilen Endgeräten. Im Gegensatz zum Infrastruktur-Netz erfolgt die Kommunikation direkt zwischen den einzelnen Endgeräten. Weitergehende Informationen zur Funktionsweise werden im Abschnitt 2.3.2 aufgegriffen und erläutert.

Des Weiteren unterscheiden sich Ad-hoc-Netze von drahtgebundenen Netzen oder auch drahtlosen Netzen mit Infrastruktur in der Form, dass sie keine feste Topologie aufweisen, d. h. sich ihre Position und auch ihre Nachbarn und somit die Verbindungen permanent verändern, und darüber hinaus auch spontan aus dem Netz verschwinden bzw. in dem Netz erscheinen können. Diese sehr mobile Form der Ad-hoc-Netze wird daher auch mit dem Begriff MANET bezeichnet, welcher auf dem englischen Ausdruck *mobile ad hoc network* basiert. Der Begriff Ad-hoc-Netz bezeichnet somit vor allem die Funktionsweise oder auch das Zustandekommen des Netzes, wobei dieses theoretisch auf unterschiedlichen Funkstandards, wie dem sehr verbreiteten IEEE 802.11 (WLAN) oder dem IEEE 802.15 (WPAN) und deren Unterspezifikationen, aufgesetzt werden kann. Grundsätzlich lassen sich drahtlose Netze nach verschiedenen Kriterien einordnen, wozu neben dem möglichen Datendurchsatz die erzielbare Reichweite zählt, aber auch z. B. der Energieverbrauch. Eine grobe Einordnung, basierend auf allgemein verfügbaren Informationen, bei der verschiedene drahtlose Standards in Bezug auf ihre Datenübertragungsrate und erzielbare theoretische Reichweite eingeordnet sind, zeigt Bild 2.9.



**Bild 2.9:** Einordnung drahtloser Funkstandards nach Reichweite und Datenübertragungsrate (dunkelgrau WPAN, mittelgrau WLAN, hellgrau WWAN)

Bei der im Bild dargestellten Einordnung ist zu beachten, dass es sich um eine grobe Einordnung handelt, bei der die typischen Reichweiten/Datenübertragungsraten-Bereiche der Standards dargestellt sind, die auf Grund einer Vielzahl unterschiedlichster Einflussfaktoren einer großen Streuung unterliegen. Zum Beispiel ist die erzielbare Reichweite unter anderem stark von der verwendeten Antennentechnik abhängig sowie von verschiedenen Umgebungsbedingungen, z. B. der Bebauung, elektrischen Anlagen und anderen Funknetzen. Die in dunkelgrau hinterlegten Beispiele sind Vertreter aus dem Bereich WPAN (Wireless Personal Area Network), die im Unterschied zu den in mittelgrau hinterlegten Beispielen aus dem Bereich WLAN vor allem dem Datenaustausch im Kurzstreckebereich dienen. Das im IEEE 802.15.4 beschriebene Übertragungsprotokoll mit seinem bekanntesten darauf aufgesetztem Industriestandard ZigBee [ZigB14] hat vor allem einen geringen Energieverbrauch und niedrige Kosten im Bereich der Heimautomatisierung zum Ziel. Das Framework bzw. die Spezifikation ZigBee nutzt die Bitübertragungs- und die Sicherungsschicht und damit die untersten beiden Schichten im OSI-Modell von IEEE 802.15.4. Bluetooth (IEEE 802.15.1), vor allem im Bereich der Anbindung von Peripheriegeräten zu finden, erlaubt hingegen höhere Datenübertragungsraten bei sehr kurzen Reichweiten. Ein Vertreter für hohe Datenübertragungsraten bei kurzen Distanzen findet sich in der Ultra-Breitband-Technologie (engl. Ultra-wideband; UWB), welche unter Nutzung einer großen Bandbreite und geringer Leistung bei kurzer Entfernung, von i. d. R. unter zehn Metern, die Übertragung von z. B. hochauflösendem Videomaterial zwischen digitalen Abspiel- und Anzeigegegeräten ermöglicht. Typische Vertreter der mittleren bis hohen Datenübertragungsraten bei mittleren Reichweiten, von in der Praxis erzielbaren 30 bis wenigen 100 Metern auf freien Flächen, finden sich im Standard 802.11x, allgemein als WLAN oder im englisch sprachigem Raum als Wi-Fi bezeichnet. Vertreter des Wireless Wide Area Networks (WWAN) sind in der Darstellung in hellgrau hinterlegt und umfassen die allgemein als Mobilfunk bezeichneten Standards. In der Darstellung beginnend mit der sogenannten „2G“ Generation (GSM, GPRS, EDGE) des Mobilfunkstandards, über die sogenannte „3G“ Generation, mit den bekannten Vertretern UMTS und HSDPA, die als erstes eine „brauchbare“ Nutzung des mobilen Internets ermöglichten, bis hin zur vierten Generation „4G“, die bei großen Reichweiten von bis zu zehn Kilometern hohe Datenübertragungsraten ermöglicht, die bisher nur bei kabelgebundenen Netzwerken möglich waren. *Long Term Evolution* (LTE), als Mobilfunkstandard dieser Generation, soll somit die Erschließung dünn besiedelter Gebiete mit schnellem Internet ermöglichen. Aktuell befindet sich der Mobilfunk-Standard der fünften Generation (5G) in der Erprobung und Einführung, der gegenüber der vierten Generation unter anderem einen zehnfachen Datendurchsatz bei extrem niedrigen Latenzen verspricht. Neu wird auch sein, dass Geräte direkt miteinander kommunizieren können, um die Vernetzung zu verbessern. Negativ ist der enorme Bedarf an Bandbreite zu sehen und die auf Grund der höheren benötigten Frequenzen deutlich kürzere Reichweite [Osse14].

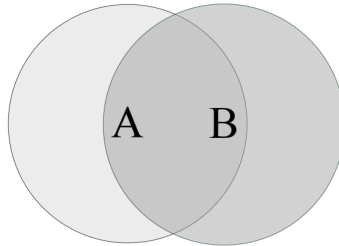


Ad-hoc-Netze finden sich bei den dargestellten Funkstandards vor allem im Bereich der WPANs, bei denen häufig nur zwei oder wenig mehr Teilnehmer miteinander kommunizieren. WWANs ermöglichen keine Ad-hoc-Netze, da diese eine umfassende Infrastruktur benötigen, bei der die verschiedenen Funkzellen über zentrale Steuereinheiten, sogenannte Back-Ends, miteinander verbunden sind. Darüber hinaus müssen die einzelnen Teilnehmer (Endgeräte) registriert sein, sich am Backend innerhalb ihrer Funkzelle anmelden etc. WWANs sind somit typische Vertreter der Infrastrukturnetze, wobei diese auf Grund der globalen Vernetzung noch eine Sonderstellung einnehmen. Innerhalb der WLANs wiederum ist sowohl der Infrastruktur-Modus möglich als auch der Ad-hoc-Modus, wobei der Infrastruktur-Modus der Struktur der Mobilfunknetze - der WWANs - ähnelt, nur dass die Netze mehr lokalen Charakter aufweisen. Theoretisch ist auch hier der Wechsel von einer WLAN-Zelle in eine andere WLAN-Zelle ohne Unterbrechung möglich, jedoch kommt es in der Praxis auf Grund von Störungen und fehlenden Vorkehrungen in den bis heute kommerziell existierenden Protokollen häufig noch zu Schwierigkeiten. Die Nutzung von WLANs im Ad-hoc-Modus ist aktuell ebenfalls eher im Bereich von Nischenanwendungen zu finden, da bei kleinräumigen Vernetzungen zumeist WPANs zum Einsatz kommen. Dennoch ist es möglich ohne die Nutzung einer zentralen Instanz ein Ad-hoc-Netz aufzubauen, bei der die koordinierenden Funktionen von den Endgeräten übernommen werden. Ein aktuelles bekanntes Beispiel hierfür findet sich im B. A. T. M. A. N. Protokoll (Better Approach To Mobile Adhoc Networking), einer Open Source Entwicklung [LiWu16]. In der Regel erfolgt die Einrichtung manuell, wobei zwei oder mehr Teilnehmer mit direkter Verbindung zueinander „vernetzt“ werden. Ein Datenaustausch ist im Standard nur bei direkter Verbindung möglich. Sollen verteilte Geräte miteinander Daten austauschen, muss das Ad-hoc-Netz um die Möglichkeit des Routings, also dem Weiterleiten von Daten, erweitert werden. Dazu müssen zyklisch Informationen über die Netztopologie gesammelt und ausgetauscht werden, womit ein Ad-hoc-Netz zu einem mobilen Ad-hoc-Netz erweitert wird. Da hierbei viele Fragen ungeklärt sind - in etwa die Frage nach der Koordinierung der Sender, der Ermittlung der Netztopologie etc. - sind diese Teil verschiedenster vergangener und aktueller Forschungsprojekte, die auf der einen Seite verschiedene Routingverfahren (siehe 2.3.3) und auf der anderen Seite verschiedene Protokolle (siehe 2.3.4) hervorgebracht haben.

### 2.3.2 Funktionsweise mobiler Ad-hoc-Netze (MANETs)

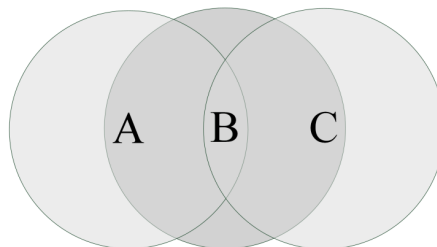
Bei mobilen Ad-hoc-Netzen (kurz MANETs) erfolgt der Netzaufbau individuell und für Ad-hoc-Netze typisch ohne eine koordinierende Instanz zwischen zwei oder mehr Netzteilnehmern, nachfolgend als Knoten bezeichnet. Die einfachste Form eines MANETs besteht demzufolge aus zwei Knoten, wie exemplarisch in Bild 2.10 dargestellt. Besteht eine

Verbindung zwischen den Knoten ohne weitere Zwischenstationen wird es als direkte Verbindung bezeichnet.



**Bild 2.10:** Einfaches Netzwerk mit direkter Verbindung der Knoten A und B

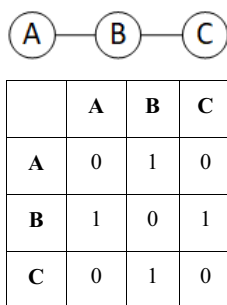
Befinden sich die Knoten, welche miteinander Daten austauschen sollen, nicht mehr in gegenseitiger Reichweite wird allgemein von einer indirekten Verbindung gesprochen, wenn diese Verbindung über einen zusätzlichen Knoten zustande kommen kann. Hierbei erfolgt die Weiterleitung der Daten basierend auf definierten Regeln, die als Routing Protokolle bezeichnet werden. Ein Beispiel für ein indirektes einfaches Netzwerk zeigt Bild 2.11, bei dem ein Datenaustausch zwischen Knoten A und C über Knoten B erfolgt. Die dafür benötigten Informationen über das Netzwerk müssen dazu zunächst ermittelt werden. Während Infrastrukturnetze hierfür zentrale Knoten – sogenannte Koordinatoren – nutzen, die alle Informationen über das Netzwerk (Teilnehmer, Adressen, etc.) verwalten und die Kommunikation regeln (Sendezeitpunkt, Paketweiterleitung, etc.), werden diese Informationen bei Ad-hoc-Netzen spontan gesammelt und dezentral – also auf jedem Knoten für sich - verwaltet.



**Bild 2.11:** Einfaches Netzwerk mit direkter Verbindung zwischen Knoten A und B sowie B und C und indirekter Verbindung zwischen Knoten A und C über Knoten B

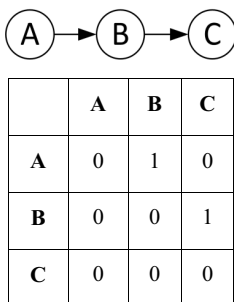
Hierzu werden Tabellen oder Listen genutzt in die die bestehenden Verbindungen, also die Kanten des Graphen, eingetragen werden. Diese werden in Form einer Adjazenzmatrix oder

einer Adjazenzliste gespeichert. Für das in Bild 2.11 dargestellte einfache Netzwerk, basierend auf einer indirekten Verbindung, stellt sich dieses wie in Bild 2.12 (unten) gezeigt dar. Bestehende Kanten (Verbindungen) werden durch die Ziffer „1“ repräsentiert, wohingegen die Ziffer „0“ für nicht vorhandene Kanten respektive Verbindungen steht. Der dazugehörige Graph ist in der oberen Hälfte der Abbildung dargestellt. Es handelt sich in diesem Fall um einen ungerichteten Graphen, da alle bestehenden Verbindungen gegenseitig vorhanden sind, wie es auch der Adjazenzmatrix zu entnehmen ist. Gerade in dynamischen Netzwerken und bei Verwendung unterschiedlichster Endgeräte ist dies aber nicht immer zutreffend, da unterschiedliche Empfangs- und Sendeeigenschaften häufig dazu führen, dass die Graphen gerichtet sind, also in Bezug auf die Datenübertragung nur eine Übertragungsrichtung möglich ist.



**Bild 2.12:** Ungerichteter Graph und Adjazenzmatrix zu Beispielnetzwerk aus Bild 2.11

Ein Beispiel für einen gerichteten Graphen zeigt Bild 2.13. In diesem Fall ist nur eine Richtung der Kommunikation von A über B nach C möglich.



**Bild 2.13:** Gerichteter Graph und Adjazenzmatrix zu Beispielnetzwerk aus Bild 2.11

Die Beschreibung von Netzwerken unter Zuhilfenahme der Graphentheorie, wie sie z. B. von DIESTEL [Dies17] zusammenfassend beschrieben wird, ermöglicht die Anwendung der Methoden der Graphentheorie zur Auswertung. Viele für den Datenaustausch relevante Eigenschaften eines vorliegenden Netzwerks lassen sich zudem mittels Methoden der linearen Algebra direkt aus der dazugehörigen Adjazenzmatrix ableiten, die in direktem Zusammenhang mit dem Graphen steht. Nachstehend erfolgt eine Auflistung der relevantesten Eigenschaften:

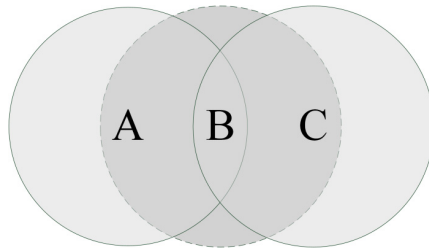
- Eine symmetrische Adjazenzmatrix repräsentiert einen ungerichteten Graphen und somit ein Netzwerk, bei dem die Kommunikation zwischen allen paarweisen Knoten immer in beide Richtungen möglich ist
- Eine unsymmetrische Adjazenzmatrix repräsentiert im Gegensatz dazu einen gerichteten Graphen und somit ein Netzwerk, bei dem die Kommunikation zwischen nicht allen paarweisen Knoten in beide Richtungen möglich ist.
- Ein Graph muss stark zusammenhängend sein, um einen vollständigen Datenaustausch aller Knoten untereinander erfüllen zu können. Dazu muss von jedem Knoten zu jedem beliebigen anderen Knoten ein gerichteter Weg über gerichtete oder ungerichtete Kanten bestehen.

Liegen die Informationen über die Netzwerktopologie vor, wird in der Regel für den Zugriff auf den Übertragungskanal und den eigentlichen Datenversand auf das Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) Prinzip zurückgegriffen, um Kollisionen der Datenpakete zu vermeiden. Das Prinzip von Collision Avoidance beruht darauf, vor dem Versand von Daten zunächst zu überprüfen, ob ein Signal empfangen wird, bevor das eigene Senden von Daten gestartet wird. Das Prinzip wurde von COLVIN [Colv83] vorgestellt und ist im Grunde eine Weiterentwicklung bzw. Anpassung des für den drahtgebundenen Datenaustausch entwickelten Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection Prinzips (CSMA/CD).

Zwei in diesem Zusammenhang auftretende Probleme, die eine hohe Relevanz für den in dieser Arbeit betrachteten Fall des drahtlosen Datenaustauschs besitzen, sind das Hidden-Station (dt: versteckter Knoten) und das Exposed-Station (dt: exponierter Knoten) Problem.

Folgendes Beispiel verdeutlicht das Problem: Knoten A (hellgrau) sendet Daten an Knoten B (dunkelgrau), wie es in Bild 2.14 dargestellt ist und Knoten C (hellgrau) möchte ebenfalls eine Datenübertragung zu Knoten B starten. In diesem Fall würde Knoten C zunächst nach dem Carrier Sense Prinzip „lauschen“, ob das Übertragungsmedium belegt ist. Aufgrund der eingeschränkten Sendereichweite kann Knoten C die Übertragung von Knoten A nicht empfangen und startet die eigene Datenübertragung. Da Knoten B sowohl in

Empfangsreichweite von Knoten A und von Knoten C liegt (hellgrau) kommt es zu einer Störung der Datenübertragung durch eine Überlagerung der Funksignale.

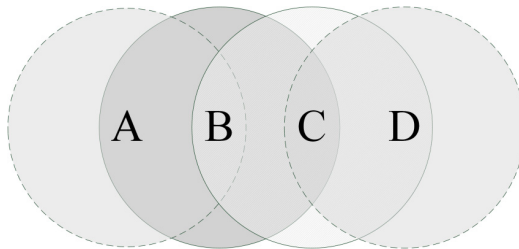


**Bild 2.14:** Hidden-Station Problem: Knoten A sendet an Knoten B, Knoten C ebenfalls an Knoten B, Überlagerung der Sendungen bei Knoten B führt zu Störungen

Um diesem Problem zu begegnen, wurde das CSMA/CA Prinzip um das Prinzip *Request To Send/Clear To Send* (RTS/CTS) erweitert. Dieses Prinzip beruht darauf, dass vor dem eigentlichen Versand von Daten zunächst eine Anfrage für diesen Datenversand – Request To Send (RTS) – versendet wird, die neben der eigentlichen Anfrage auch den zu übermittelnden Datenumfang enthält und erst nach dem erfolgreichen Empfang der Freigabe – Clear To Send (CTS) – die Übertragung begonnen wird. Im dargestellten Beispiel würde Knoten A die Datenübertragung mit einer RTS-Nachricht einleiten, diese würde von Knoten B mit einer CTS-Nachricht bestätigt werden, worauf Knoten A mit der Übertragung beginnt. Knoten C empfängt die CTS-Nachricht ebenfalls und wartet mit dem Übertragungsversuch ab, bis die in der CTS-Nachricht ebenfalls übermittelte Zeit für die Datenübertragung von Knoten A zu Knoten B verstrichen ist. Nachteile dieses Verfahrens sind der relativ hohe Datenoverhead durch die zusätzlichen Nachrichten auf der einen Seite und der damit verbundene erhöhte Zeitbedarf für Datenübertragungen. Für den Fall, dass Knoten A und C gleichzeitig RTS-Nachrichten aussenden und diese auf Grund einer Kollision verloren gehen, entfällt die CTS-Nachricht von Knoten B. Das Prinzip sieht hierfür eine Wartezeit der Knoten bis zu einem erneuten Übermittlungsversuch einer RTS-Nachricht vor, die über den sogenannten Backoff Exponenten konfiguriert wird und in Abhängigkeit von anderen Parametern (siehe [IEEE11]) quasi zufällige Wartezeiten generiert. In ungünstigen Netzwerktopologien mit einer hohen Auslastung führt dieses zu einem hohen Zeitaufwand.

Das in Bild 2.15 dargestellte Exposed-Station Problem beschreibt den umgekehrten Fall. Es wird auf Grund des CSMA/CA-Prinzips eine mögliche Störung erkannt, die für das Übertragungsziel jedoch keine Relevanz besitzt. Im dargestellten Beispiel findet eine Datenübertragung von Knoten B (dunkelgrau) zu Knoten A (hellgrau) statt. Knoten C (schraffiert) möchte eine Datenübertragung zu Knoten D (hellgrau) beginnen. Diese wird

durch das CSMA/CA-Prinzip verhindert, obwohl es zu keinem Konflikt kommen würde. Dieses Problem besitzt somit keinen Einfluss auf die Übertragungsqualität, sondern wirkt sich nur auf den Datendurchsatz aus.



**Bild 2.15:** Exposed-Station Problem: Knoten B sendet zu Knoten A, Knoten C prüft, ob Sendung an Knoten D möglich ist mit negativem Ergebnis (False positiv), da das Übertragungsmedium zwar belegt, aber für die Übertragung von C zu D nicht relevant ist

Für den Nachrichtenaustausch als solches kommen zudem verschiedene Arten von Nachrichten in Betracht. Sind keine Informationen über andere Knoten vorhanden, so kann mittels sogenannter **Broadcast-Nachrichten** eine nicht-adressierte Nachricht verschickt werden. Liegen Informationen über andere Knoten vor, kann entweder ein einzelner Knoten mittels einer **Unicast-Nachricht** direkt adressiert werden, oder eine bestimmte Menge an Knoten (als Untermenge aller erreichbaren Knoten) mittels einer sogenannten **Multicast-Nachricht**. Während der Empfang von Broadcast-Nachrichten vom Empfänger nicht quittiert wird, erfolgt bei Unicast- oder Multicast-Nachrichten zudem einer Quittierung in Form eines sogenannten Acknowledgements (ACK), also einer Bestätigung des Empfangs. Diese ACKs können dazu verwendet werden die Übertragung zu überprüfen, um gegebenenfalls bei einem Scheitern der Übertragung einen erneuten Übertragungsversuch durchzuführen, benötigen aber ebenfalls Übertragungszeit. Je nach Anwendung steht diese allerdings nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung bzw. geht zu Lasten der verfügbaren Zeit für den Nutzdatenaustausch. Somit muss je nach Anwendung genau abgewogen werden, ob die Verwendung sich vor- oder nachteilig auswirkt.




### 2.3.3 Routing in Ad-hoc-Netzen

Allgemein bezeichnet Routing die Ermittlung des Weges von einer Quelle zu einem Ziel sowie den anschließenden Austausch der Nutzinformation. Häufig gibt es mehrere Möglichkeiten eine Information zu übermitteln oder auf einen anderen Sachverhalt übertragen – eine Fahrstrecke – zurückzulegen. Das Routing schließt dabei mannigfaltige Anforderungen

ein. Hierzu zählen unter anderem Kriterien wie die benötigte Zeit, die Anzahl der Zwischenstationen, die Auslastung der Routen etc. Je nach Anforderung und Anwendung werden also verschiedene Verfahren benötigt.

Routingverfahren lassen sich zunächst einmal danach unterscheiden, wann (zeitlich) sie zum Einsatz kommen. Je nach Applikation kann dieses im Vorfeld einer gewünschten Nachrichtenübermittlung stattfinden, z.B. zyklisch, dann wird von einem **proaktiven** Ansatz gesprochen, oder ausgelöst durch die Übermittlungsanforderung erst in Reaktion auf diese, also **reaktiv**. Ein wesentlicher Vorteil von proaktiven Ansätzen ist, dass die Adjazenzmatrix für das Netz permanent aktualisiert wird und somit ohne zeitliche Verzögerung eine Route für eine Nachricht ermittelt werden kann. Als nachteilig ist der hohe Anteil an sogenannten Overheaddaten, also Daten, die zu den Nutzdaten hinzukommen, zu nennen, welche für die Netzerkundung notwendig sind. Dem gegenüber steht der reaktive Ansatz. Dieser minimiert die Overheaddaten, indem eine Netzerkundung bzw. Routenermittlung nur bei Bedarf durchgeführt wird. Häufig kommen auch Mischformen aus beiden Ansätzen, sogenannte Hybridverfahren zum Einsatz, bei denen Subnetze einem proaktiven Verfahren unterliegen und die Verbindung zwischen den Subnetzen reaktiv ermittelt wird (z. B. Zone Routing Protocol siehe 2.3.4). Je nach Applikation ist der Übergang durchaus fließend, wenn z. B. hochfrequent Nachrichten in einem dynamischen Netzwerk verschickt werden sollen. Die Bewertung, ob eine Methode mehr oder weniger geeignet ist, hängt zudem stark von der Anwendung ab und kann auch innerhalb einer Anwendung wechselnden Anforderungen unterliegen. Nachfolgende Tabelle 2.2, welche in ähnlicher Form schon in [Scha12] gezeigt wurde, fasst die wesentlichen Vor- und Nachteile der prinzipiellen Routingansätze noch einmal in erweitertem Umfang übersichtlich zusammen, auf die im nachfolgenden Abschnitt spezifischer eingegangen wird.

**Tabelle 2.2:** Übersicht prinzipieller Routingansätze (nach [Scha12])

	Proaktiv	Reaktiv	Hybrid
Positiv	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzögerungsfreie Datenübertragung</li> <li>• Netztopologie bei jedem Teilnehmer bekannt</li> <li>• Konstanter Overhead</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringer Datenoverhead</li> <li>• Geringe Anzahl an Nachrichten bei eher statischer Netztopologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kombination der Vorteile beider Verfahren passend zu den Anforderungen</li> </ul>
Negativ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Datenoverhead</li> <li>• Hohe Anzahl an Nachrichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzögerte Datenübertragung</li> <li>• Bei sehr dynamischen Netzen steigt Anzahl der Nachrichten schnell an</li> <li>• Dynamischer Overhead</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Komplexität der Algorithmen.</li> </ul>
Beispiele			

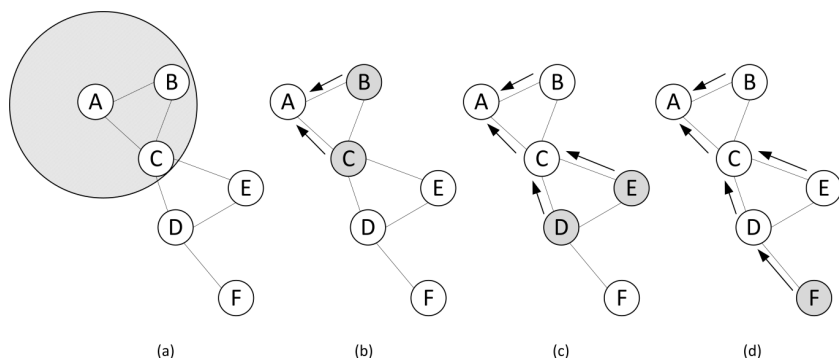
### 2.3.4 Routing-Protokolle

Im folgenden Abschnitt erfolgt ein kurzer Überblick über die am weitesten verbreiteten Routing Protokolle, die im Zusammenhang mit mobilen Ad-hoc-Netzen eingesetzt werden. Diese sind speziell auf die besonderen Herausforderungen des Routings in Ad-hoc-Netzen ausgelegt, die sich grundlegend von den Anforderungen in stationären Netzen unterscheiden. Einer der populärsten Vertreter der Algorithmen, der im Folgenden stellvertretend etwas ausführlicher dargestellt wird, ist der **Ad-hoc on-demand Distance Vector (AODV)** Algorithmus, welcher 1999 von PERKINS und ROYER [PeRo99] beschrieben wurde und bei dem es sich um einen reaktiven Algorithmus handelt.

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, lässt sich jedes Ad-hoc-Netz zu jedem Zeitpunkt mittels eines Graphen beschreiben, welcher aus Kanten (Verbindungen) und Knoten (Teilnehmern)



besteht. Für ein Beispielnetz ist zur Erläuterung der Funktionsweise das Prinzip des AODV-Algorithmus in Bild 2.16 dargestellt, das aus sechs Knoten (A, B, C, D, E, F) besteht. Die Kanten sind in diesem Fall ungerichtet, es besteht also eine bidirektionale Verbindung zwischen den entsprechenden Knoten. Die Beschreibung des allgemeinen Vorgehens erfolgt in Anlehnung an TANENBAUM ([Tane03], S. 415–419) in zusammenfassender Weise.



**Bild 2.16:** Funktionsweise AODV-Algorithmus ([Tane03], S. 415–419), (a) Reichweite einer Broadcastnachricht von A, (b) B und C haben den Broadcast von A erhalten, (c) D und E haben den Broadcast von C erhalten, (d) F hat den Broadcast von D erhalten. Grau hinterlegte Knoten sind neue Empfänger, Pfeile zeigen den Nachrichtenweg (rückwärts) an

Im gezeigten Beispiel soll ein Datenpaket von Knoten A an Knoten F übermitteln werden. Dazu wird durch den AODV-Algorithmus auf jedem Knoten eine Tabelle mit Informationen unterhalten und gepflegt. Ausgangssituation in diesem Fall ist, dass Knoten A keine Informationen bzgl. des Zielknotens F besitzt und somit einen Weg ermitteln muss. Der Algorithmus ist also bedarfsgesteuert (im Englischen - *on demand*).

Um eine Route zu Knoten F zu ermitteln, erstellt A ein sogenanntes *Route-Request-Paket* (*RREQ*) und versendet dieses als Broadcast. Im ersten Schritt (vgl. Bild 2.16 (a)) erreicht diese Nachricht die Knoten B und C, die innerhalb der Empfangsreichweite liegen. Dieses *Route-Request-Paket* ist wie in Bild 2.17 dargestellt, aufgebaut.

Quelladresse	Anforderungs-kennung	Zieladresse	Quell-Folgenummer	Ziel-Folgenummer	Teilstrecken-zähler
--------------	----------------------	-------------	-------------------	------------------	---------------------

**Bild 2.17:** Format Route-Request-Paket (RREQ)

Neben der Quell- und Zieladresse enthält das Paket eine Anforderungskennung, die einem, von jedem Knoten verwaltete, Zähler entspricht und in Kombination mit der Quelladresse jedes *RREQ* eindeutig zuordnet. Somit lassen sich Duplikate eindeutig erkennen und von den empfangenden Knoten ggf. entfernen bzw. ignorieren. Die Felder Quell- und Zielfolgennummer dienen der Unterscheidung der Informationen in Bezug auf ihre Aktualität, ähnlich einem Zeitstempel oder Takt, wobei der Wert der Quellfolgennummer bei jedem Versand eines *RREQ* oder dem Empfang einer Antwort auf ein *RREQ* erhöht wird. Die Aufgabe dieser Felder bzw. Zähler wird in der weiteren Erläuterung aufgegriffen.

Dem Beispiel folgend empfangen Knoten B und C, wie in Bild 2.16 (b) dargestellt, das *RREQ*-Paket und verarbeiten dieses wie folgt:

1. An Hand der eindeutigen Beschreibung aus Quelladresse und Anforderungskennung wird in einer Tabelle überprüft, ob es sich bei der Nachricht um
  - a. **ein** Duplikat handelt → Abbruch der Verarbeitung
  - b. **kein** Duplikat handelt → Weiterverarbeitung und Abspeicherung der Informationen in einer Tabelle
2. Es wird überprüft, ob das Ziel in der Routing-Tabelle
  - a. **vorhanden ist** → Erstellung und Übermittlung eines Route-Reply-Pakets (*RREP*) mit Informationen zum Weg von der Quelle zum Ziel
  - b. **nicht vorhanden ist** → Weiterverarbeitung der Anfrage im dritten Schritt
3. Inkrementieren des Teilstreckenzählers um den Wert 1 und erneutes Versenden des *RREQ*-Pakets mit den in der Anfrage enthaltenen Informationen. Zusätzlich werden die Informationen extrahiert und in einer als Rückweg-Tabelle (*Reverse Route Table*) bezeichneten Form abgespeichert, welche unter anderem auch einen Zeitstempel zur Überprüfung der Lebenszeit enthält.

Im Falle des Beispiels handelt es sich weder bei B noch bei C um die Zieladresse, sodass beide Knoten einen Eintrag anlegen, der auf die Quelle verweist (dargestellt durch die Pfeile in Bild 2.16 (b)) und dem dritten Schritt folgend die Anfrage erneut versenden. Diese Nachrichten erreichen von B gesendet A und C, die die Anfrage beide als Duplikat erkennen und nicht weiter verarbeiten. Die Nachricht von C erreicht hingegen D und E, die die Nachricht in gleicher wie eben beschriebener Weise weiterverarbeiten und ebenso einen Eintrag mit einem Verweis auf C anlegen (Bild 2.16 (c)). Im, in diesem Beispiel, letzten Schritt wird die Nachricht von D nur von F als neue, nicht als Duplikat einzuordnende, Nachricht erkannt. Zudem identifiziert sich F als Ziel des *RREQ*-Pakets und sendet als Antwort ein Route-Reply-Paket, welches wie in Bild 2.18 dargestellt aufgebaut ist und nachfolgend erläuterte Einträge enthält (Fall Schritt 2 a).

Quelladresse	Zieladresse	Ziel-Folgenummer	Teilstrecken-zähler	Lebensspanne
--------------	-------------	------------------	---------------------	--------------

**Bild 2.18:** Format Route-Reply-Paket (RREP)

Dieses *RREP*-Paket wird zunächst mit den aus dem *RREQ*-Paket stammenden Informationen Quelladresse und Zieladresse sowie dem Wert des Teilstreckenzählers gefüllt. Die Zielfolgenummer wird dem internen Zähler entnommen und der Teilstreckenzähler zu 0 gesetzt. Über das Feld Lebensspanne kann zudem übermittelt werden, wie lange der Weg gültig ist. Während die Suche über Broadcast-Nachrichten erfolgte, wird die Rückantwort mittels Unicast-Nachrichten, also zielgerichtet, übermittelt. Dem Beispiel folgend, geschieht die Übermittlung des *RREP*-Pakets über Knoten D zu C und schlussendlich zu A, wobei bei jedem Nachrichtenversand der Teilstreckenzähler inkrementiert wird und am Ziel (der Quelle der Anfrage) angekommen die Anzahl der nötigen Übermittlungen repräsentiert.

Wie beim *RREQ*-Paket bei der Suche nach einem Übertragungsweg, werden auch auf dem Rückweg verschiedene Überprüfungen basierend auf Regeln beim Empfang einer Nachricht auf jedem Knoten vollzogen, und ein Eintrag in die auf dem Knoten verwaltete Routing-Tabelle vorgenommen. Ein Eintrag erfolgt, wenn zumindest eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

1. Die Routing-Tabelle enthält keinen bekannten Weg zum Zielknoten.
2. Die Zielfolgenummer im *RREP*-Paket ist höher als der Wert in der Routing-Tabelle, die Information ist dementsprechend neuer.
3. Die Zielfolgenummer im *RREP*-Paket besitzt den gleichen Wert, jedoch ist der Weg kürzer.

Die Teilabschnitte über den Weg von der Quelle zum Ziel werden auf diese Weise abschnittsweise auf den auf dem Weg liegenden Knoten mitgelernt und abgespeichert. Gegenteilig verwerfen die Knoten, die das *RREQ*-Paket erhalten haben, jedoch nicht auf dem Weg liegen, die Information nach Ablauf einer bestimmten Zeitfrist. Insgesamt führt der Algorithmus bei stark wechselnden Netztopologien und größeren Netzen zu vielen *RREQ*-Nachrichten, welche sich durch geschickte Wahl der Parameter (z. B. der Lebensspanne) etwas reduzieren lassen, aber auch zu vielen möglichen Datenkollisionen (wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben) führen können.

Um der Veralterung der Informationen entgegenzuwirken, die z. B. durch einen Standortwechsel eines Knotens oder durch das Aus- bzw. Einschalten eines Knotens entsteht, sieht der Algorithmus zudem eine zyklische Überprüfung der Datenaktualität vor, indem jeder Knoten in periodischen Abständen eine Nachricht versendet. Bekommt er auf diese Anfrage von dem in seiner Routing-Tabelle geführten Knoten keine Antwort, so kann er diese

Verbindung löschen. Ebenso generiert sich diese Information aus dem erfolglosen Versuch einer Datenübertragung.

Darüber hinaus interpretiert der Algorithmus die Auswirkung der Veränderung auf bei anderen Knoten gespeicherten Routen und informiert diese zielgerichtet, um fehlerhafte Übertragungsversuche zu verhindern. Im Gegensatz zu manchen anderen Algorithmen werden beim AODV-Algorithmus keine vollständigen Routing-Tabellen übertragen, sondern lediglich erkannte Unterschiede. Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit des Algorithmus findet sich auch in MITTAL UND KAUR [MiKa09].

An dem eben genannten Verfahren zur zyklischen Überprüfung der Aktualität der Daten sowie der gezielten Verteilung neuer Informationen wird auch schon deutlich, dass eine scharfe Abgrenzung in proaktive und reaktive Algorithmen nicht immer klar vorzunehmen ist, da es durchaus fließende Übergänge gibt. So lässt sich sagen, dass ein reaktiver Algorithmus in einem Netzwerk mit hochdynamischen Veränderungen der Topologie quasi das Verhalten eines proaktiven Algorithmus in Bezug auf die Anzahl und den Zeitpunkten der Versendung von z. B. *RREQ*-Paketen zeigen wird.

Das erstmals von JOHNSON in [John95] vorgestellte **Dynamic Source Routing** ähnelt im Grunde dem AODV-Protokoll und ist, wie dieses auch, ein Vertreter für ein reaktives Protokoll, da die Verbindung erst bei einem konkreten Verbindungswunsch gesucht wird. Der größte Unterschied liegt in der Vorhaltung der Informationen und in der Verteilung dieser. Anstatt Routingtabellen bei jedem Teilnehmer vorzuhalten und zu aktualisieren, werden die benötigten Informationen mit den zu übermittelnden Daten verschickt. Jeder Teilnehmer kann somit aus empfangenen Nachrichten die Informationen über das Netzwerk extrahieren und diese bei Bedarf selber verwenden, was zu geringeren Hardwareanforderungen führt. Performancevergleiche [BoMh12] zeigen bei höher ausgelasteten Funknetzwerken Vorteile des DSR-Protokolls gegenüber dem AODV-Protokoll in Bezug auf den Datenoverhead. Der Vorteil des einfachen „Mitlauschens“ von Informationen stellt aber gleichzeitig einen Nachteil dar, da der Aufwand zur Unterscheidung aktueller von nicht aktuellen Informationen ansteigt.

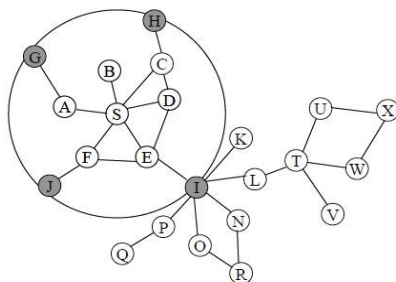
Das **Optimized Link State Routing** (OLSR) ist ein Vertreter der proaktiven Routing-Algorithmen und wurde basierend auf dem Link State Routing (LSR) entwickelt und von der Network Working Group 2003 veröffentlicht [CIJa03]. Informationen über die Netztopologie werden auf allen Knoten permanent vorgehalten. Das Grundprinzip basiert darauf, dass jeder Knoten sogenannte Multipoint-Relays (MPR) festlegt, über die er Daten verschickt und diese Information an diese Knoten weitergibt. Voraussetzung ist lediglich eine bidirektionale Verbindung zwischen den Knoten. Die Weitergabe der Informationen erfolgt periodisch, sodass die Aktualität direkt mit der Periodenzeit zusammenhängt, wobei eine hohe Aktualität auch zu einem erhöhten Datenoverhead führt. Das Protokoll sieht zwei unterschiedliche

Nachrichten vor. Sogenannte Hello-Nachrichten werden zur Netzerkundung und zur Übermittlung der MPR Auswahl eingesetzt. Topology-Control-Nachrichten verteilen die gewonnenen Nachrichten im gesamten Netz, sodass jeder Knoten eine eigene Routingtabelle pflegen kann, wie sämtliche Knoten im Netz erreichbar sind. Die Weitergabe der Informationen erfolgt nur über die MPRs, sodass die Flutung des Netzwerks mit den Informationen gegenüber anderen Protokollen optimiert ist. Untersuchungen zur Performance unter verschiedenen Einsatzbedingungen finden sich u. a. in KULLA ET AL. [Kull12] und COSTA-REQUENA ET AL. [Cost06].

Beim **Destination Sequenced Distance Vector Protocol (DSDV)**, das 1994 von PERKINS UND BHAGWAT in [PeBh94] vorgestellt wurde, handelt es sich ebenfalls um einen proaktiven Routingansatz, bei dem mittels einer periodischen Nachricht die Routingtabellen zwischen allen Knoten ausgetauscht und damit einhergehend aktualisiert werden. Dieser Ansatz basiert, wie viele andere auch, auf dem Bellman-Ford Routing Algorithmus. Ziel war es vor allem das auftretende Problem der Schleifen zu verhindern, welche zum Versagen von Routing-Algorithmen führen können, wenn einzelne Verbindungen ausfallen und es nicht zu einer Aktualisierung der Routing-Tabellen kommt. Dieses wird durch die Einführung von sequentiellen Zählern erreicht (vgl. Beschreibung AODV), welche es ermöglichen, veraltete Informationen von neuen Informationen zu unterscheiden und entsprechend die aktuelleren Informationen zu verarbeiten. Die Route wird basierend auf der neusten Information oder bei gleicher Aktualität basierend auf der besseren Verbindung ausgewählt. Diese wird. i. d. R. aus der geringeren Anzahl an notwendigen Nachrichtenweitergaben (engl. Hops) oder bei gewichteten Kanten aus der z. B. besseren Verbindungsqualität abgeleitet. Durch die nötigen periodischen Aktualisierungen der Routing-Tabellen, die über weniger häufige sogenannte *full dumps* erfolgen, bei denen alle Informationen aktualisiert werden und häufigere *incremental dumps*, bei denen nur ein Teil der Informationen aktualisiert wird, kommt es auch zu Datenverkehr, wenn keine Nutzdaten übertragen werden sollen. Dieses wird allgemein als nachteilig in Bezug auf den Energieverbrauch mobiler batteriebetriebener Endgeräte angesehen. Noch entscheidender im Hinblick auf dynamische Topologieveränderungen ist jedoch, dass für eine erfolgreiche Datenübertragung zunächst immer eine neue Sequenznummer generiert und verteilt werden muss und somit der Datenoverhead stark ansteigt. Abhilfe schafft hier das reaktive AODV-Protokoll.

Das **Zone Routing Protocol (ZRP)**, das erstmals 1997 von HAAS [Haas97] vorgestellt wurde, ist ein Beispiel für eine Kombination aus einem proaktiven und einem reaktiven Routingverfahren und damit ein hybrides Protokoll. Das ZRP unternimmt eine Einteilung des Gesamtnetzes in verschiedene Zonen. Im nahen Umfeld eines Knotens wird ein proaktiver Ansatz genutzt, bei dem die Informationen über die Nachbarschaftsbeziehungen zyklisch aktualisiert werden. Besteht der Bedarf, Daten an einen weiter entfernten Knoten zu senden,

so wird die Route reaktiv ermittelt. Dies reduziert auf der einen Seite den Datenoverhead erheblich und erhält gleichzeitig die kurze Reaktionszeit beim Datenversand zu nahe gelegenen Knoten. Die Größe der Zonen und somit der Übergang vom proaktiven in einen reaktiven Ansatz ist maßgeblich verantwortlich für die Performance des Algorithmus. Auf Grund der vielen Einflussfaktoren ist die Zonengröße allerdings nicht trivial zu bestimmen. Details zur Funktion und zur Performance finden sich u.a. in einer Veröffentlichung von BEIJAR [Beij02]. Das daraus entnommene Bild 2.19 zeigt ein Beispiel für ein Netzwerk in dem das ZRP Protokoll aus Sicht von Knoten S Anwendung findet.

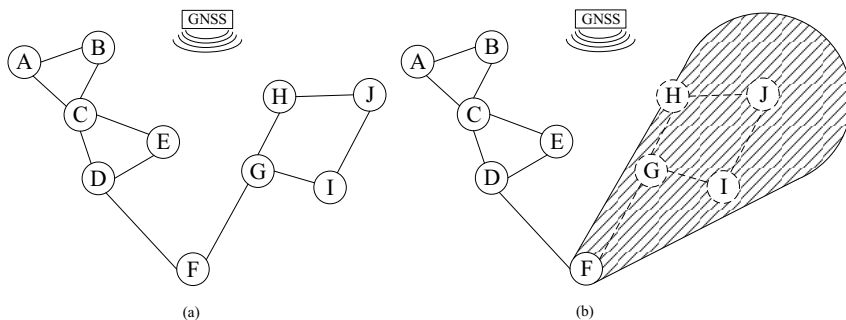


**Bild 2.19:** Beispielnetzwerk für das Zone Routing Protocol (ZRP) (vgl. [Beij02]) mit dargestelltem Bereich für eine proaktive Ermittlung der Verbindungen um Knoten S

In diesem Beispiel, welches vollständig an genannter Stelle nachgelesen werden kann, beträgt der Zonenradius  $\rho=2$  (dargestellt mit dem Kreis um Knoten S). Innerhalb dieses Radius sind dem Knoten S alle anderen Knoten bekannt. Soll eine Nachricht an einen Knoten übermittelt werden, welcher außerhalb der Zone liegt, erfolgt dieses über schon vorgestellte reaktive Ansätze.

Einen ähnlichen Ansatz zur Eingrenzung des Bereichs, in denen reaktive Algorithmen zur Ermittlung eines Pfades herangezogen werden, verfolgen Routingansätze bei denen die Position der Knoten bekannt, oder zumindest prognostizierbar ist. Beispiele hierfür sind das **Location Aided Routing** (LAR), das von KO UND VAIDYA im Jahr 2000 [KoVa00] umfassender beschrieben wurde und das **Location Prediction Based Routing Protocol** (LPBR) [ShNa02] aus dem Jahr 2002. Die Grundidee ist bei allen Ansätzen ähnlich und basiert darauf, die vorhandenen Informationen zum Aufenthaltsort der Knoten, z. B. basierend auf Positionsinformationen (z. B. GPS), mit in den Routing-Algorithmus einzubeziehen und daraus Aussagen zur Erreichbarkeit und zum Graphen des Netzwerks abzuleiten. Die Idee wurde auch schon an verschiedenen anderen Stellen in früheren Jahren publiziert [KoVa99b], [KoVa99a], [ImNa99], [DoJa96] auf die an dieser Stelle nicht vertiefend eingegangen wird. Bild 2.20 verdeutlicht das Prinzip für das dargestellte Beispielnetzwerk, in dem für jeden

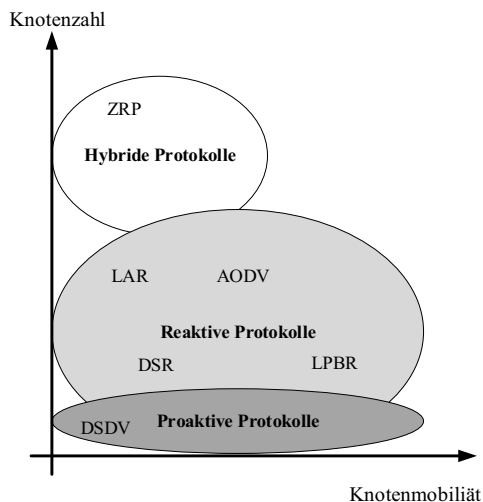
Knoten eine satellitenbestimmte Positionsinformation zur Verfügung steht. Möchte beispielsweise Knoten F Daten an Knoten J senden, werden die Informationen über den letzten Aufenthaltsort des Zielknotens genutzt, um speziell in diesem Bereich bzw. in Richtung dieses Bereiches (Zone) eine Route zu ermitteln (Bild 2.20 (b) schraffierter Bereich), während der nicht schraffierte Bereich nicht mit unnötigen Nachrichten belastet wird.



**Bild 2.20:** Prinzip ortsbezogener Routingansätze

Die Nutzung weiterer Informationen, z. B. Richtungsvektoren, Geschwindigkeiten, etc. ermöglicht eine weitere Verfeinerung der Algorithmen durch eine Steigerung der Genauigkeit der Prädiktion, geht aber auch mit einer höheren zu verwaltenden Informationsmenge einher. Auch das 1999 von SU und GERLA vorgestellte Flow Oriented Routing Protocol [SuGe99] zählt zu den positionsbezogenen Routingverfahren mit einem Fokus auf der Übertragung von Daten in Echtzeit und dem Ziel die Unterbrechungen der Datenverbindung (z. B. Bild- oder Tondaten) zu minimieren. Dazu wird die Prädiktion des Aufenthaltsortes der Knoten um eine Vorhersage für die Lebenszeit bestehender Verbindungen erweitert. Darauf aufbauend lässt sich somit auch eine zeitliche Eingrenzung vornehmen, wann eine neue Route ermittelt werden muss.

Bild 2.21 ist ein Ansatz, eine **Zusammenfassung** der verschiedenen vorgestellten Routingprotokolle nach ihrer Eignung in Bezug auf die Knotenmobilität (aufgetragen auf der Abszisse) und die Anzahl der Knoten (aufgetragen auf der Ordinatenachse) vorzunehmen, wobei noch verschiedene andere Kriterien möglich wären. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass mit steigender Knotenzahl reaktive Protokolle zunächst im Vorteil gegenüber proaktiven Algorithmen sind, jedoch bei sehr großen Netzen wiederum eine Kombination beider Ansätze vorteilhaft zu beurteilen ist. Eine hohe Knotenmobilität wiederum erfordert Algorithmen, die die Fähigkeit besitzen, schnell auf Topologieveränderungen zu reagieren.



**Bild 2.21:** Routingprotokolle nach Eignung für steigende Knotenzahl und Knotenmobilität gruppiert nach proaktiven (dunkelgrau), reaktiven (mittelgrau) und hybriden (hellgrau) Protokollen

Entscheidend für den eigentlichen Datenaustausch ist die Ermittlung der Netztopologie und einhergehend mit der Art des Datenaustauschs (Paketgröße, Häufigkeit, Empfängerkreis) die Art und Weise der Netzerkundung und Pflege der Informationen. Ausschlaggebend für die Wahl des richtigen Algorithmus ist die Ermittlung der besonderen Anforderungen der Anwendung, die sehr unterschiedlich sein können. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde eine große Vielzahl verschiedener Ansätze entwickelt und untersucht. Häufig erfolgten die Untersuchungen rein simulativ, teilweise wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Der Großteil der Untersuchungen nutzt 802.11 als Basis für die Implementierung und somit einen Vertreter aus dem Bereich der WLANs und betrachtet Szenarien, in denen einzelne Daten von einer Quelle mit einem Ziel in einem Netzwerk mit vielen Teilnehmern ausgetauscht werden sollen.

## 2.4 Grundlagen der Satellitenortung

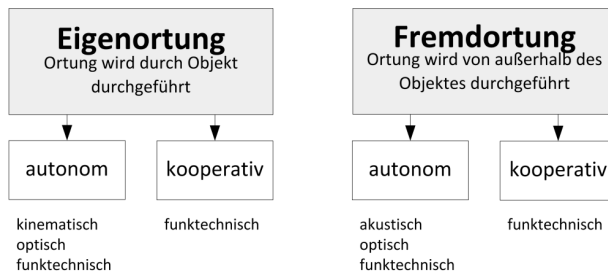
Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen der Satellitenortung zusammenfassend vorgestellt, wobei nach einer kurzen allgemeinen Einführung auf die Funktionsweise, mögliche Störeinflüsse und abschließend auf die Korrekturmethode eingegangen wird.



Weiterführende Informationen können dem zusammenfassenden Werk „Satellitenortung und Navigation“ von MANSFELD [Mans04] und dem Vorlesungsumdruck „Satellitenavigation“ [Heck14] entnommen werden, sodass hier nur auf die relevanten technischen Grundlagen eingegangen wird, die zum Verständnis der Anforderungen an den Datenaustausch für die Relativpositionierung notwendig sind.

### **2.4.1 Allgemeine Einführung in die Satellitenortung**

Die Bestimmung der eigenen Position ist für viele Aufgaben und Vorgänge eine substantielle Notwendigkeit. Während die Orientierung in der Vergangenheit in der Regel an Hand von markanten Ortsmarken oder an Hand anderer charakteristischer Merkmale durchgeführt wurde, wurden mit der Überwindung größerer Distanzen und in unbekannten Gebieten weitere Methoden notwendig. Im Speziellen ist an dieser Stelle sicherlich die Orientierung an Hand der Gestirne z. B. in der Seefahrt zu nennen, die in Kombination mit weiteren Hilfsmitteln, z. B. einem Kompass, also der Orientierung mittels des Erdmagnetfeldes - bei guten Bedingungen - eine sichere Bestimmung der eigenen Position ermöglicht (Eigenortung). Mit der zunehmenden Mobilität des Menschen stieg der Bedarf für eine präzise und zuverlässige Bestimmung der eigenen Position weiter an, wie auch der Bedarf die Position entfernter Objekte bestimmen zu können (Fremdortung). Alle Verfahren basieren im Grunde auf der Auswertung geometrischer Beziehungen, die sich mittels des mathematischen Verfahrens der Trigonometrie beschreiben lassen. Als gegenwärtig sicherlich wichtigste Methode zur Bestimmung der absoluten Position auf der Erde ist das globale Navigationssatellitensystem (engl. Global Navigation Satellite System), kurz GNSS, zu nennen. Der Grundgedanke der Satellitenortung ist es, die zur Positionsbestimmung notwendigen Referenzpunkte in Form von Satelliten zu installieren, um basierend auf ausgesendeten und empfangenen Signalen die eigene Position zu bestimmen. Nach HECKER ([Heck14], S. 1–2) unterscheidet die Geodäsie die Begriffe Ortung, Positionsbestimmung und Navigation, wobei die Ortung die Bestimmung der Lage eines Objektes mit veränderlicher Position ist und wiederum in Fremd- und Eigenortung unterschieden werden kann. Ein Beispiel für die Fremdortung ist z. B. die Verwendung von Radar, da hier die Ortung von außerhalb des Objektes durchgeführt wird. Die Satellitenortung wiederum zählt zu den Eigenortungsverfahren, da die Ortung durch das Objekt – den Empfänger selbst – erfolgt. Für beide Verfahren sind sowohl autonome – also eigenständige – als auch kooperative Verfahren möglich, wie es Bild 2.22 zeigt. Die Satellitenortung zählt somit zu den Verfahren der kooperativen Eigenortung.



**Bild 2.22:** Einordnung Eigen- und Fremddortung (vgl. [Mans04])

Ortung und Positionsbestimmung wiederum unterscheiden sich dadurch, dass sich im Gegensatz zur Positionsbestimmung die Ortung auf ruhende Objekte bezieht und die zur Bestimmung benötigte Zeit eine eher untergeordnete Rolle spielt.

## 2.4.2 Funktionsweise Positionsbestimmung

Die Positionsbestimmung bei GNSS-Systemen erfolgt entweder basierend auf der Auswertung des Codes oder auf der Auswertung der Phasenlage. Beide Prinzipien werden nachfolgend kurz dargestellt. Bei der Codemessung wird das Prinzip der Korrelation des vom Satelliten empfangenen Signals mit einem gleichartigen im Empfänger selbst erzeugten Referenzsignal genutzt. Dafür finden die für jeden Satelliten individuell existierenden Pseudo Random Noise-Impulsfolgen (PRN) Anwendung, die jedem GNSS-Empfänger bekannt sind. Da sich die beiden Signale nur zeitlich unterscheiden, ergibt die Korrelation der Signale als Ergebnis den zeitlichen Versatz der Signale zueinander. Bild 2.23 zeigt unterschiedliche Phasen des Messvorgangs. Bei vollständiger Synchronisierung wird von der Herstellung der Verbindung zum Satelliten gesprochen. Die Phasenverschiebung beschreibt zudem das Maß des Empfängeruhrenoffsets.

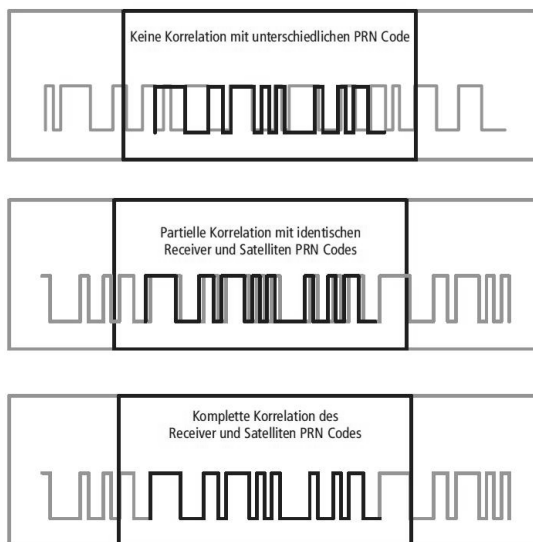
Basierend auf der Codemessung kann die gemessene Pseudorange zum Satelliten bestimmt werden. Diese setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Geometrische Entfernung zum Satelliten  $p$
- Satellitenuhrenoffset der GPS-Zeit  $dt$
- Empfängeruhrenoffset der GPS-Zeit  $dT$
- Verzögerung durch Ionosphäre  $d_{\text{iono}}$
- Verzögerung durch Troposphäre  $d_{\text{trop}}$
- Restfehler auf Grund von Empfängerrauschen und/oder Mehrwegeausbreitungen  $\epsilon$

Die Pseudorange ergibt sich somit zu

$$PR = \rho + c \cdot (dt - dT) + d_{iono} + d_{trop} + \epsilon \quad (2.1)$$

und beinhaltet die möglichen Stör- und Fehlerquellen auf die im Abschnitt 2.4.3 eingegangen wird.



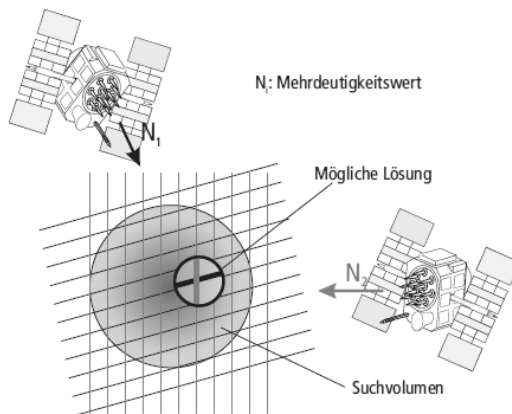
**Bild 2.23:** Abschnitte der Codemessung ([Heck14], S. 74), keine, partielle und komplette Korrelation des Receiver und Satelliten PRN Codes

Die Phasenmessung nutzt neben der Codemessung zusätzlich die in der Trägerfrequenz des Signals enthalten Informationen. Dieses wird als Träger-Phase-Verfahren bezeichnet und untersucht die Übereinstimmung von Frequenz und Phase des hochfrequenten Signals. Voraussetzung ist die im Ansatz beschriebene erfolgte Synchronisierung des PRN-Codes. Prinzipbedingt lässt sich die Phasenlage sehr gut bestimmen, allerdings ist die Anzahl der absoluten Zyklen zwischen der Aussendung des Signals vom Satelliten und dem Empfang im Empfänger unbekannt.

Die Lösung der Trägerphase  $\Phi$  ergibt sich analog zur Lösung der Pseudorange, ergänzt um das Produkt des ganzzahligen Faktors des Mehrdeutigkeitsanteils  $N$  mit der Wellenlänge  $\lambda$ , wobei an dieser Stelle der Fehler durch die Ionosphäre negativ zu berücksichtigen ist [Heck14], [Mans04].

$$\Phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda \cdot N - d_{iono} + d_{trop} + \epsilon \quad (2.2)$$

Die Wellenlänge des verwendeten Signals L1 bei GPS beträgt beispielsweise  $f_1 = 1575,42 \text{ MHz}$  und ergibt damit alle neunzehn Zentimeter eine mögliche Lösung und somit eine Mehrdeutigkeit der Lösung, wie es Bild 2.24 zeigt.



**Bild 2.24:** Mehrdeutigkeit der Phasenmessung ([Heck14], S. 75)

Dieses Mehrdeutigkeitsproblem lässt sich (nach [Mans04], S. 164–165) in der Praxis mit zwei Methoden lösen, bei denen es sich zum einen um die geometrische Methode handelt und zum anderen um eine Methode, bei der eine Kombination mit der Codemessung erfolgt:

1. Geometrische Methode: Bei der geometrischen Methode wird die zeitabhängige Veränderung der geometrischen Verhältnisse zwischen Satellit und Empfänger genutzt. Diese Methode findet bei langfristigen Messungen über mehrere Stunden oder Tage Anwendung. Die Lösung des unbekannten Mehrdeutigkeitsanteils  $N$  erfolgt durch eine inertielle Schätzung und aus der Lösungskonvergenz über einen langen Zeitraum.
2. Bei der Kombination mit dem Verfahren der Codemessung wird zunächst eine Startlösung basierend auf dieser bestimmt, welche den Mehrdeutigkeitsanteil enthält. Anschließend werden für verschiedene Konstellationen Messungen durchgeführt, ebenfalls eine Schätzung für  $N$  vorgenommen und diese Schätzung iterativ variiert bis ein besseres Ergebnis erzielt wird (Float-Lösung). Anschließend werden erneut für alle benachbarten Integer-Werte des Mehrdeutigkeitsanteils Lösungen errechnet, miteinander verglichen und eine Charakterisierung basierend auf der Standardabweichung vorgenommen. Das

Ergebnis ist eine Lösung für den Mehrdeutigkeitsfaktor  $N$  mit der kleinsten Standardabweichung, die als Fixed-Lösung bezeichnet wird.

Eine weitere Ergänzung zur Lösung beschreibt die lineare Kombination der Trägerfrequenzen  $L1$  und  $L2$ , die allerdings nur bei Zwei-Frequenz-Empfängern möglich ist. Bei dieser werden die Trägerfrequenzen  $L1$  ( $f_1 = 1575,42 \text{ MHz}$ ) und  $L2$  ( $f_2 = 1227,60 \text{ MHz}$ ) kombiniert, womit sich eine Differenzfrequenz  $f_1 - f_2 = 347,82 \text{ MHz}$  für die Trägerphase ergibt und somit eine Wellenlänge von rund 86 Zentimetern. Daraus ergibt sich für die Mehrdeutigkeit ein Rückgang um den Faktor 4 und somit eine Einschränkung des Lösungsraumes. Dieses Verfahren wird auch als Wide-Lane Verfahren bezeichnet.

Entscheidend für die Beschreibung der Position des eigenen Aufenthaltsortes und darüber hinaus für die Lage fremder Objekte in Bezug auf die eigene Position sind die **Koordinatensysteme der Bezugspunkte**, die für eine Umrechnung bekannt sein müssen. Zum Beispiel verwendet die Satellitenortung als Bezugspunkte die Satelliten, deren Aufenthaltsort zum Zeitpunkt der Messung dem Empfänger bekannt sein müssen und die in einem globalen und geozentrischen Bezugssystem beschrieben werden. Die Angabe der Position des GNSS-Empfängers jedoch erfolgt i. d. R. in Breiten- und Längengraden. Bei terrestrischen Vermessungsanwendungen werden vielmals lokale Bezugssysteme genutzt. Die Umrechnung der verschiedenen Bezugssysteme erfolgt somit über entsprechende Beziehungen, bei denen auch die jeweilige Beobachtungszeit eine entscheidende Rolle spielt.

Bei den gebräuchlichen Koordinatensystemen handelt es sich um das kartesische Koordinatensystem, das Gauß-Krüger-Koordinatensystem, das UTM-Koordinatensystem und das geozentrische Koordinatensystem, auf deren Beschreibung an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen und auf die genannte Fachliteratur verwiesen wird.

Nach MANSFELD sind vier **Zeitsysteme** für die Beobachtung von Satellitenbewegungen sowie zur Nutzung von Messergebnissen relevant:

Die Sternzeit und Weltzeit werden aus der Erdrotation abgeleitet. Auf Grund der Erdrotation und auf Grund von Schwankungen sind diese ohne Anpassung als Zeitskala aber ungeeignet. Daher wurde die mittlere Weltzeit (UT) eingeführt, die auf den Beobachtungsergebnissen vielzähliger astronomischer Beobachtungsstationen beruht. Die Umrechnung auf einen gemeinsamen Standort definiert die Zeit UT1.

- Die **Dynamische Zeit** wird aus der Bahnbewegung der Erde im Raum abgeleitet und basiert somit auf der zeitabhängigen Position anderer Himmelskörper.
- Die **Atomzeit** wird aus atomphysikalischen Vorgängen abgeleitet und besitzt eine sehr hohe, den Praxisanforderungen gerecht werdende, Genauigkeit. Diese Internationale Atomzeitskala (TAI) stimmt mit der Weltzeitskala UT1 vom 1.1.1958 um 00:00 Uhr

überein. Auf Grund von Schwankungen der Erdrotation ergibt sich über die Zeit eine Differenz zwischen der Atomzeit und der UT1 Zeit.

- Die **koordinierte Weltzeit UTC** entspricht weitgehend der Atomzeit TAI, ermöglicht jedoch eine Anpassung der Sekundenzählung um die Differenz zur UT1 Zeit auszugleichen. Die koordinierte Weltzeit entspricht somit  $UTC = TAI - n \text{ (Sekunden)}$ , wobei n eine ganze Zahl darstellt, die am 1. Januar und am 1. Juli angepasst wird. Die UTC Zeit wird durch ein weltweites Netz an Atomuhren kontrolliert. Auch das Satellitenortungssystem TRANSIT nutzte die UTC Zeit. GPS hingegen nutzt eine eigene Zeitskala, die am 6.1.1980 um 00:00 Uhr mit der UTC Zeit übereinstimmte und auf Grund der fehlenden Schaltsekunde einer geringen Abweichung unterliegt.

Die Umrechnung von in verschiedenen Zeitskalen erfolgten Messungen kann über die Beziehungen der einzelnen Zeitsysteme erfolgen.

### 2.4.3 Störeinflüsse

Die bei der Positionsbestimmung auftretenden Einflüsse, die eine Verschlechterung der Positionsgenauigkeit zur Folge haben, lassen sich grob in drei Bereiche einteilen: **Satellitenseitige Fehlerquellen**, **Signallaufzeitfehler** und **Messfehler** beim Empfang. Alle Fehlerterme wurden schon in den Gleichungen (2.1) und (2.2) für die Pseudorange und die Trägerphase definiert und werden an dieser Stelle in Kurzform dargestellt.

Die **satellitenseitigen Fehler** basieren im Grunde auf drei Ursachen, wobei als erstes der Uhrenfehler zu nennen ist, der als Abweichung der Satellitenzeit von der GPS-Systemzeit definiert ist. Dieser Fehler variiert zwischen den Satelliten und unterliegt einer gewissen Drift. Die Genauigkeit der Atomuhren der Satelliten liegt bei einer Stabilität die besser ist als  $10^{-13}$  (entspricht in etwa eine Sekunde Abweichung in über 300.000 Jahren). Ungenauigkeiten sind somit der genannten Drift zuzuordnen, welche zu Schwankungen der Positionsgenauigkeit im Bereich von plus-minus einen Meter führen. Künstlich erzeugte Uhrenfehler, wie sie z. B. durch die amerikanische Regierung bis ins Jahr 2000 herbeigeführt wurden, sorgten für eine Verschlechterung in der Größenordnung von 10 bis 50 Metern.

Ein zweiter Fehler entsteht durch die fehlerbehafteten Bahnparameter (Ephemeridenfehler) für die Satellitenbahnen auf Grund von Rundungsfehlern bei der Übertragung der Bahndaten, die der maximal übertragbaren Datenmenge geschuldet sind. Die Ungenauigkeiten in den Bahndaten haben somit eine direkte Auswirkung auf die Genauigkeit der Positionslösung des Empfängers und können ebenfalls direkt beeinflusst werden. Der dadurch entstehende Fehler liegt im Bereich von zweieinhalb Metern.

Der letzte - jedoch verschwindend geringe und technisch eigentlich auch nicht relevante - Fehler ist den relativistischen Effekten zuzuordnen, da nach der Relativitätstheorie bewegte Uhren langsamer gehen als feststehende Uhren, was für die in den Satelliten installierten Uhren zutreffend wäre. Dem entgegen steht allerdings die allgemeine Relativitätstheorie, die besagt, dass die abnehmende Gravitation für einen schnelleren Uhrenlauf sorgt. Beide Effekte zusammengenommen sorgen somit für eine theoretische Voreilung der Uhren, die in einer verringerten nominellen Frequenz der Satellitenuhren berücksichtigt ist. Allerdings werden diese Fehler auch durch eine ständige Überwachung durch Bodenkontrollstationen und entsprechende Korrekturen ausgeglichen.

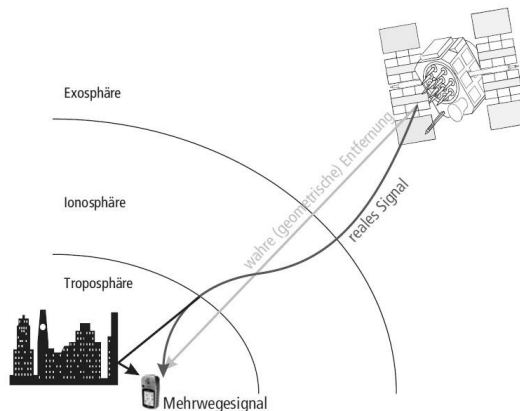
Ein weiterer großer Störeinfluss auf die Positionsgenauigkeit ist den **Signallaufzeitfehlern** zuzuschreiben, die vor allem auf Grund der Ionosphären- und Troposphäreneffekte auftreten und zu einer Differenz zwischen der geometrischen Entfernung und der zurückgelegten Strecke führen und in Bodennähe durch die Mehrwegeausbreitung der Satellitensignale.

Der Ionosphärenfehler (vgl. ([Heck14], S. 90–93, [Mans04], S. 173–175)) ist zusammengefasst dem Effekt zuzuordnen, dass sich die Signale in der Ionosphäre auf Grund der Zusammensetzung, die Schwankungen unterliegt, die z. B. der Sonnenaktivität zuzuordnen sind, nicht geradlinig ausbreiten, sondern Richtungsänderungen unterliegen, die zu einem längeren Laufweg führen. Einen weiteren Effekt hat zudem die frequenzabhängige Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Grund des dispersiven Mediums in der Ionosphäre, das der hohen Ionendichte geschuldet ist. Die dadurch entstehenden mittleren Fehler sorgen für eine Positionsungenauigkeit von fünf Metern, die sich zum einen durch die Verwendung von Ionosphärenmodellen herausrechnen lassen (hier existieren unterschiedlich genaue Formen) und durch die Auswertung der zweiten Übertragungsfrequenz L2, da der Brechungsindex frequenzabhängig ist und sich somit mittels einer Zweifrequenzmessung Rückschlüsse ziehen lassen, um den Fehler zu kompensieren. Allerdings ist der Einsatz von Zweifrequenzempfängern angesichts der wesentlich aufwendigeren Technik mit deutlich höheren Kosten verbunden.

Im Gegensatz zum Ionosphärenfehler ist der Troposphärenfehler nicht von der Frequenz abhängig und lässt sich somit auch nicht mittels der Auswertung der Signale herausrechnen, sondern nur mittels Modellen bestimmen. Der Einfluss der Signallaufzeit ist von den meteorologischen Parametern Luftdruck, Luftfeuchte und Lufttemperatur abhängig. Der Anteil der in der Troposphäre entstehenden Fehler macht in etwa zehn Prozent der Gesamtlaufzeitverzögerungen aus, hat jedoch mit einem Fehler im Bereich von 2 bis 30 m eine große Auswirkung.

Die dritte Fehlerquelle ist der Mehrwegeausbreitung der Signale zuzuordnen und ist je nach Sichtweise dem Ausbreitungsweg bzw. den Signallaufzeitfehlern zuzuordnen [Mans04] oder dem Messfehler beim Empfang [Heck14]. Bild 2.25 zeigt in einer abstrahierten Darstellung

das Phänomen und den dadurch entstehenden Fehler bei der Laufzeit des Signals, der beim Mehrwegesignal durch die Reflektion des Signals vor allem in urbanen Anwendungen zum Tragen kommt.



**Bild 2.25:** Mehrwegeausbreitung eines Satellitensignals (vgl. [Heck14], S. 108)

Der Fehler wirkt sich sowohl auf den Code als auch auf die Phase aus, wenn auch unterschiedlich stark. Bei der Codemessung können Fehler bis in Bereiche mehrerer Meter (in Ausnahmen bis zu 100 Meter) auftreten. Bei der Phasenmessung beschränkt sich der Fehler auf nur einige Zentimeter, allerdings können Phasenverschiebungen zum Verlust der Satellitenverbindung und damit zu einem Sprung in der Lösung führen. Abhilfe schaffen spezielle Antennen, die zum Beispiel die im flachen Winkel und somit in der Regel auf Reflektionen basierenden Signale abschirmen oder langfristige Messungen, da sich die Fehler in Anbetracht der veränderten Konstellationen in der Regel herausfiltern. Auch die genaue Auswertung der Signalpegel kann genutzt werden, um die direkten Signale von den reflektierten Signalen zu unterscheiden. Dies setzt allerdings einen gewissen Signalpegelabstand voraus, wie auch die Auswertung des zeitlichen Eintreffens der PRN-Folgen.

Nachdem die Störeinflüsse auf der Senderseite (Satellit) und auf der Übertragungsseite vorgestellt wurden, wird abschließend auf die **Messfehler beim Empfang**, also auf Empfangsseite eingegangen. Diese Störeinflüsse wirken sich entweder ebenfalls direkt auf die Signallaufzeit aus oder sie reduzieren die Signalstärke. Auch diese lassen sich in verschiedene Bereiche einordnen, wobei zunächst die Fehler im Empfänger selbst zu nennen sind und sich aus dem Messrauschen (wenige Millimeter beim militärischen P-Code auf dem L2-Band bis zu drei Metern beim zivilen C/A-Code auf dem L1-Band), den Uhrenfehlern (Drift der



Quarzuhren in Folge von Temperatur- und Beschleunigungseinflüssen) und den im inneren Aufbau des Empfängers (Leitungswiderstände etc.) auftretenden Signalverzögerungen zusammensetzen. Eine weitere Ungenauigkeitsquelle liegt in den verwendeten Antennen und dem vom Einfallswinkel abhängigem Antennenphasenzentrum dieser Antennen, auf die sich die Positionslösung bezieht. Je nach Antennenausführung können in diesem Zusammenhang ebenfalls Fehler bis zu einem Dezimeter entstehen. Zwei weitere Quellen für Ungenauigkeiten sind im Bereich der Signalabschattung, die durch die Wahl des Antennenstandortes beeinflusst werden kann, aber auch stark vom Aufenthaltsort (Wald, Häuserschluchten, etc.) abhängig ist und im Bereich der Signalstörung durch Interferenzen etc. zu finden. Letztgenannte sind verschiedenen Ursachen zuzuordnen, auf die an dieser Stelle aber nicht vertiefend eingegangen werden soll (siehe u.a.[Mans04], S. 177–182).

Insgesamt betrachtet ergibt sich somit als Summe der Fehlerquadrate ein Fehlerquadrat von rund  $65 \text{ m}^2$  nach HECKER [Heck14] und von rund  $106 \text{ m}^2$  nach MANSFELD [Mans04] mit einer Wahrscheinlichkeit von  $W = 68,3$  Prozent, was einer Gesamtabweichung von acht Metern bzw. gut zehn Metern entspricht. Die künstliche Verschlechterung der Uhrengenauigkeit (Selective Availability), wie sie lange Zeit von den USA betrieben wurde, verschlechterte die Genauigkeit auf einen Gesamtwert von gut 33 Metern. Daneben sind die größten Fehlerquellen den Beeinflussungen der Signale in der Ionos- und Troposphäre zuzuschreiben sowie den fehlerbehafteten Ephemeridendaten.

Ein Ansatz, um bei vielen Fehlern Korrekturen vornehmen zu können, ist die Verwendung mehrerer Empfänger und der damit verbundenen differentiellen Verfahren, die im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt werden und ebenso dem Grundlagenverständnis der Anforderungen für das Kommunikationskonzept dienen.

## 2.4.4 Korrekturmethoden

Korrekturmethoden zur Verbesserung der Positionslösung basieren darauf, Störeinflüsse, die im vorangegangenen Abschnitt 2.4.3 aufgezeigt wurden, mathematisch herauszurechnen, wenn die Annahme zutreffend ist, dass sie für die beteiligten Empfänger im gleichen Maße auftreten. Dieses trifft z. B. auf die Laufzeitfehler der Signale zu, die durch die Einflüsse der Ionosphäre und Troposphäre entstehen. Gerade bei relativ geringen Abständen der Empfänger zueinander ist somit die Annahme zulässig, dass die den Signalen aufgeprägten Störungen nahezu gleich sind.

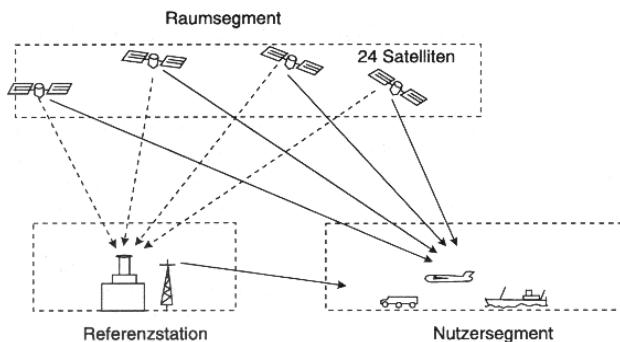
Die mathematische Grundlage dafür bildet die allgemeine Navigationsgleichung, auf die an dieser Stelle kurz eingegangen werden soll. Wie bekannt, werden zur eindeutigen Bestimmung der Position die Pseudoschrägentfernungen zu vier Satelliten benötigt, um das

Gleichungssystem zu lösen. Mit Hilfe des räumlichen Pythagoras lässt sich für die Pseudoschrägentfernung (PR) folgende Gleichung aufstellen,

$$PR = \sqrt{(x_{sv} - x_u)^2 + (y_{sv} - y_u)^2 + (z_{sv} - z_u)^2} + c \cdot \Delta t + \epsilon \quad (2.3)$$

bei der  $(x_{sv}, y_{sv}$  und  $z_{sv})$  die Position des Satelliten aus den Ephemeriden beschreiben und  $(x_u, y_u$  und  $z_u)$  die Position des Empfängers.  $\Delta t$  beschreibt den Uhrenoffset und  $\epsilon$  beinhaltet als Summand die weiteren Fehlereinflüsse. Die Lösung erfolgt auf Grund der vier Unbekannten für die Position (x, y, z) und die Zeit und auf wegen der Tatsache, dass es sich um eine nichtlineare Gleichung handelt durch Linearisierung an einem Arbeitspunkt mittels der Taylor-Reihe und unter Verwendung von vier Pseudoschrägentfernungen.

Der klassische Ansatz des Systems des Differential-Messverfahrens (DGPS) beruht darauf, mittels Referenzstationen, deren Positionen eindeutig bestimmt sind, die Satelliten zu beobachten und Korrekturdaten zu errechnen, um diese an das Nutzersegment zur Korrektur derer Positionslösungen weiterzugeben, wie in Bild 2.26 dargestellt.



**Bild 2.26:** Prinzip des Differential-Messverfahrens ([Mans04], S. 213)

Die Übertragung der Korrekturdaten erfolgt dabei über eine zusätzliche Kommunikationsstrecke und kann nur lokal um die Referenzstation verwendet werden, da viele Störungen vom relativen Aufenthaltsort der Empfänger abhängig sind. Bei der Anwendung von GPS und auch GLONASS können zwei Messgrößen als Basis dienen, zum einen die Code-Phase und zum anderen die Träger-Phase. Die Anwendung des differentiellen Messverfahrens in Verbindung mit der Code-Phase liefert Genauigkeiten im Meterbereich und wird als DGPS (oder D-GLONASS) bezeichnet. Die Nutzung der Träger-Phase in Kombination mit dem differentiellen Verfahren ermöglicht höhere Genauigkeiten im Zentimeterbereich, jedoch besteht hier wie auch bei der Phasenlösung im stand alone Ansatz die Herausforderung der

Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems. Verschiedene Ansätze aus dem Bereich der Ortung im Vermessungswesen haben zu einem Konzept zur Bestimmung der Position von Nutzern in Echtzeit geführt, das als Real Time Kinematic (RTK) bezeichnet wird [Mans04].

Die Verwendung von DGPS ermöglicht es, im Grunde alle Fehler bis auf das Empfängerrauschen (~2 Meter), die Mehrwegeausbreitung (~2,5 Meter) und auftretende Interferenzen (0,5 Meter) basierend auf dem C/A-Code zu eliminieren und somit Genauigkeiten im Bereich von rund drei Metern zu erreichen, wobei auch die künstliche Verschlechterung keine Auswirkung auf die Genauigkeit hat. Entscheidend für das Ergebnis ist, wie schon erwähnt, die örtliche Nähe zwischen Referenzstation und Nutzersegment, da mit steigender Entfernung eine Abnahme der Genauigkeit verbunden ist. Die Verteilung der Korrekturdaten erfolgt auf verschiedene Weisen in Form von Funk, unter Nutzung des Internets bzw. der Mobilfunknetze (z. B. RTCM, Ntrip) oder auch über Kommunikations-satelliten (SBAS, EGNOS, WAAS, etc.). Die verschiedenen Dienste unterscheiden sich in Form ihrer Datenprotokolle und sind oftmals mit Nutzungsgebühren verbunden, die zum Teil auch abhängig von den Genauigkeitsanforderungen sind. So ähneln die kommerziellen Dienste OmniSTAR der Firma Trimble [Omni15] oder StarFire der Firma John Deere [Deer15] dem Prinzip der Verteilung von Korrektursignalen mittels geostationärer Satelliten, ermöglichen aber durch anderer nicht frei zugänglicher Daten höhere Genauigkeiten.

Für hochgenaue Positionslösungen im Bereich der Vermessung, aber auch im Bereich des Precision Farmings in der Landwirtschaft, findet die Träger-Phasen Lösung ihre Anwendung, die im Grunde auf dem gleichen Prinzip wie DGPS beruht, jedoch die Mehrdeutigkeitsproblematik der Phasenlösung lösen muss. Dazu wird i. d. R. ebenso ein stationärer Empfänger eingesetzt der Langzeitbeobachtungen zur Problemlösung nutzen kann und auch ein mobiler Empfänger, der die entsprechenden Korrekturdaten empfängt. Unterscheiden lassen sich zudem drei Varianten der Messung:

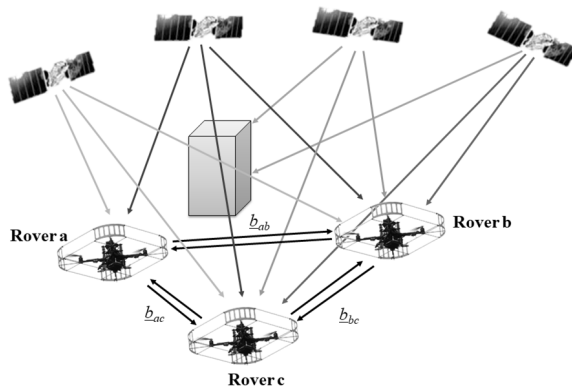
- Einfachdifferenzen – Messung der Trägerphase zwischen einem Satelliten und zwei Empfängern zur Bestimmung der satellitenabhängigen Fehler und der ionosphärischen und troposphärischen Einflüsse oder zwischen zwei Satelliten und einem Empfänger zur Bestimmung empfängerseitiger Fehler
- Zweifachdifferenzen – Kombination von zwei Einfachdifferenzen – Messung der Trägerphase zwischen zwei Satelliten und zwei Empfängern zur Eliminierung der Fehler
- Dreifachdifferenzen – Kombination von zwei Zweifachdifferenzen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten – Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems

Wichtig für den Ansatz der Relativpositionierung ist an dieser Stelle, dass sich sowohl die Fehler in Ephemeriden als auch die Fehler auf Grund der Laufzeitfehler im differentiellen

Ansatz herauskürzen und sich somit für die Position zweier (oder mehrerer) Empfänger untereinander eine höhere Genauigkeit ergeben kann.

Spielt nicht die absolute Positionierung für die Anwendung die entscheidende Rolle, sondern die relative Positionierung mehrerer bewegter Objekte zueinander, kann das grundsätzliche Verfahren zur Schwarmpositionierung verwendet werden, welches eine Erweiterung der state-of-the-art Doppeldifferenzverfahren darstellt.

Für diesen Ansatz müssen die GNSS Rohmessungen aller beteiligten Rover untereinander ausgetauscht werden, um sowohl die absoluten Positionen als auch die relativen Positionen zu bestimmen. Bild 2.27 zeigt das Prinzip der Schwarmpositionierung am Beispiel von drei Rovern und einer Konstellation mit vier Satelliten, die nur teilweise in Sichtverbindung zu den Rovern stehen.



**Bild 2.27:** Prinzip kombinierter Algorithmus ([HeBe13], S. 48) bei dem alle Rohdaten untereinander ausgetauscht werden

Der Ansatz der Schwarmpositionierung basiert zumindest in Teilen auf den beschriebenen doppeldifferenzierten Entfernungsmessungen. Damit ist es nicht zwingend erforderlich, dass alle Rover zu den gleichen Satelliten eine Sichtverbindung besitzen, jedoch müssen Schnittmengen sichtbarer Satelliten bei den Rovern vorhanden sein. Besitzen alle Rover zu zumindest einem Satelliten eine Sichtverbindung, so kann dieser als "Basissatellit" für den differentiellen Anteil des Algorithmus zur Schwarmpositionierung herangezogen werden. Auf die Beschreibung des gesamten Algorithmus soll an dieser Stelle verzichtet und auf die ausführliche Beschreibung an Hand eines Beispiels in ([HeBe13], S. 48–53) verwiesen werden.

## 2.5 Thematisch verwandte Forschungsprojekte

Der Datenaustausch zwischen mobilen Maschinen, zwischen Nutzfahrzeugen und zwischen Personenkraftwagen hat in den letzten Jahrzehnten und im Besonderen in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dazu beigetragen haben die Nachfrage nach Telematik-Lösungen und der steigende Grad an Automatisierung bis hin zur Autonomisierung. Begünstigt wurde der Datenaustausch durch die Verbreitung der Mobilfunknetze und dem mobilen Internet, als Basis für verschiedenste Datendienste. Abzugrenzen hiervon ist der drahtgebundene Datenaustausch, in der Regel innerhalb einer Maschine, welcher z. B. auf dem CAN-Bus oder zwischen Maschine und Anbaugerät auf dem ISOBUS (vgl. ISO 11783) basiert und hier nicht weiter betrachtet wird. Ein zusammenfassender Überblick über die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der letzten Zeit erfolgt nachstehend aufgegliedert nach den Schwerpunkten mobile Arbeitsmaschinen und Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen.

Im Bereich der **mobilen Arbeitsmaschinen**, an dieser Stelle mit Fokus auf dem landtechnischen Bereich, hat der Einsatz von Teleservicesystemen mit dem Aufkommen der ersten funkbasierten Datendienste in Deutschland basierend auf dem GSM-Standard Anfang der 1990er Jahre Einzug gehalten und stellt somit in gewisser Weise den Beginn des Einsatzes der Datenkommunikation in der Landtechnik dar [Wiki14], [Schi03]. Wie von MEYER ET AL. schon Ende der 1990er Jahre in [MeKD98] beschrieben, sind die Einsatzbereiche von Teleservicesystemen vielseitig und lassen sich in die Bereiche Fernwartung und –diagnose, Ferninbetriebnahme und –manipulation, Prozess- und Maschinenmodellierung und Aufbau kundenorientierter Dienstleistungen und Recyclingsysteme gliedern. Während in der Anfangszeit vor allem die Übermittlung von Informationen von der Maschine zum Hersteller bzw. Servicepartner zwecks gerade genannter Aufgaben im Vordergrund stand, entwickelte sich das Anwendungsfeld weiter in Richtung komplexerer Systeme. Bei diesen rückte neben einem reinen Informationsaustausch auch die Steuerung und Regelung in den Fokus. So untersuchte WELTZIEN [Welt09] ein „Assistenzsystem für den Überladevorgang bei einem selbstfahrenden Feldhäcksler“ (ASÜL) mit dem Ziel, durch die Ermittlung der Relativposition des Feldhäckslers zum Transportfahrzeug sowohl die Position des Auswurfkrümmers zu regeln als auch eine Assistenz für den Fahrer der Transporteinheit in Bezug auf die Längsrichtung bereitzustellen. Dazu erfolgte ein Austausch der Positionsdaten sowie weiterer Informationen zwischen Feldhäcksler und Abfahrwagen. Einen anderen Schwerpunkt hatte das Forschungsprojekt DAMIT [GöHa07], bei dem das Datenmanagementsystem für den Teleservice bei mobilen Arbeitsmaschinen betrachtet wurde. Hierin wurde das besondere Anforderungsprofil an die Kommunikationssysteme unter Einbeziehung der Datensicherheit, der Übertragungszeiten und der Datenkompression

betrachtet. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchte GÖRES speziell die Möglichkeit der Datenkompression zur Reduzierung der immer größer werdenden Datenmengen am Beispiel mobiler Arbeitsmaschinen für Messwertzeitreihen und Positionsdaten. Das von GÖRES [Göre09] präsentierte Ergebnis zeigt, dass sich die untersuchten Originaldaten (aufgezeichnete Positionsdaten) ohne maßgebliche Informationsverluste um über 90 Prozent reduzieren lassen. RUSCH wiederum widmete sich dem Thema der Datensicherheit bei selbstkonfigurierenden Funknetzwerken [Rusc12], [MeRu08], [RuMe08]. In seinen Untersuchungen lag der Fokus auf dem Aufbau eines Funkübertragungssystems für ein Dokumentationssystem für landwirtschaftliche Prozesse. Die Anforderung lag darin alle relevanten Prozessdaten zum einen automatisch und zum anderen unter Nutzung von Nahbereichsfunkschnittstellen vom Ort der Datenerfassung zum Datenserver zu übertragen. Neben der Verwendung eines Ad-hoc Netzwerkes zur Datenübertragung wurde ebenfalls untersucht, auf welche Weise ein zielgerichteter Datentransport von der Quelle Mähdrescher über die Transportfahrzeuge zum Hofserver gewährleistet werden kann und dies unter der Prämisse der Datensicherheit in Bezug auf Vermeidung von Datenverlust und Zugriff durch Unbefugte. Die Untersuchungen waren Teil des öffentlich geförderten Projektes „Landwirtschaftliches, selbstkonfigurierendes Kommunikationssystem zur Überwachung, Optimierung und Dokumentation von Ernteprozessen“ (LaSeKo), in dem auch das Thema der Maschinendiagnose unter Verwendung des entwickelten Datenübertragungssystems von SCHERER ET AL. [Sche10] adressiert wurde. AUTERMANN UND KLUGE [AuKl08] wiederum geben einen Überblick über die Anforderungen an die Kommunikation aus Sicht der Landmaschinen im Datennetzwerk und unterteilen die Anwendungen, bei denen ein Datenaustausch notwendig ist, bzgl. ihrer Anforderungen in drei Klassen:

- Managementanwendungen: Maschine bindet sich in ein Informationsnetzwerk ein
- Assistenzsysteme: Maschine bindet sich in ein lokal begrenztes Maschinennetzwerk ein (z. B. GPS-Lenkung, Maschinenregler)
- Automatisierungsanwendungen: Maschine kommuniziert mit direktem Umfeld; Fahrer-, Anbaugeräte- oder Produkterkennung und entsprechende Interpretation bzw. Reaktion auf die Informationen

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt iGreen ([Deut14], [BeDe09]) hatte zum Ziel, ein standortbezogenes Dienste- und Wissensnetzwerk zur Verknüpfung verteilter, verschiedener, öffentlicher und auch privater Informationsquellen zu konzeptionieren und zu realisieren, ist also nach der Einteilung von Autermann und Kluge im Bereich Managementanwendungen angesiedelt.

Das BMWI-Verbundprojekt marion „Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten“ [ClRe13] widmet sich hauptsächlich dem Thema der Prozess-

automatisierung, sowohl im Bereich Intralogistik als auch im landwirtschaftlichen Umfeld, und betrachtet die gesamte Wertschöpfungskette. Das BMWI-Projekt R2B „Robot2Business“ hat sich zum einen speziell mit der Selbstorganisation und teilautonomen Funktionen in der Grünfütterernte beschäftigt [Stec11], zum anderen mit der Entwicklung eines Konfigurators für die selbstorganisierende Vernetzung [BrER10].

HORSTMANN [Hors14] beschreibt die Anforderungen und den Ansatz für herstellerübergreifende Kommunikationsansätze in der Landtechnik, die die große Spannweite von reinen Informationskanälen bis zur Maschinensteuerung abdecken müssen. Auch RUSCH ET AL. [Rusc14] spezifizieren die Anforderungen an ein Kommunikationsmodul aus der Sicht der Landtechnik, welche im Rahmens des Projekts „M2M-Teledesk“ ermittelt wurden und sich laut RUSCH ET AL. in fünf Punkte zusammenfassen lassen:

- Permanente Internetverbindung
- Geringe Latenz für die Maschinensteuerung (< 50ms)
- Direkte Maschinenverbindung ohne Mobilfunknetz bis zu zwei Kilometern
- Datenvolumen von mehr als 1 Gigabyte in akzeptabler Zeit
- Globale Verfügbarkeit (Frequenzen, Funkstandards, Provider, ...)

Spiegelt man diese Anforderungen mit den schon im Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Eigenschaften des zukünftigen 5G Standards, so wird dieser sicherlich für einen großen Schritt im Bereich der Automatisierung mobiler Anwendungen sorgen, sofern eine lückenlose Netabdeckung im ländlichen Raum realisiert werden kann.

Laut HORSTMANN [Hors17] und SONNEN [Sonn19] besteht ein wesentlicher Punkt der Nutzung der Kommunikationsmöglichkeiten für die Digitalisierung der Landtechnik vor allem darin, neben der technischen Realisierung Konzepte zu entwickeln, die die Themen Datensicherheit, Datenhoheit und den Nutzen der Daten in Geschäftsmodellen adressieren und einen herstellerübergreifenden Datenaustausch ermöglichen. Diese Themen adressiert auch das im Rahmen des Zentrums für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN) initiierte Zukunftslabor Agrar, das sich in einem breitem Konsortium aus wissenschaftlichen Einrichtungen mit den zentralen Aspekten Datenmanagement und Dateninterpretation, Automatisierung und Autonomie sowie den Auswirkungen der Digitalisierung auf das Arbeitsumfeld etc. beschäftigt. Als wichtig hierbei werden im Zusammenhang mit Daten auf der einen Seite die Transparenz, aber auch die Sicherheit angesehen [Zent19]. Besonders für den landtechnischen Bereich bedeutet dies keine Eingrenzung auf die Maschinenhersteller, sondern eine übergreifende und offene Austauschplattform, die auch Drittanbieter, Dienstleister, Software- bzw. App-Anbieter, Agrarhändler etc. einschließt. Die von der Firma DKE-Data entwickelte Datenaustauschplattform agrirouter [DKE19] hat genau dies zum Ziel und wird von einem Konsortium namhafter Landtechnik-Unternehmen getragen.

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) ausgeschriebenen Förderung „Digitale Experimentierfelder“ [BMEL19] soll speziell untersucht werden, wie die Digitalisierung, bei der die Kommunikation eine entscheidende Rolle spielt, konkret aussehen kann. Andere öffentlich geförderte Projekte wie ODiL „Offene Software-Plattform für Dienstleistungsinnovationen in einem Wertschöpfungsnetz in der Landwirtschaft“ [Deut19] und SDSD „Smarte Daten, Smarte Dienste“ [Deut17] betrachten vor allem das Datenmanagement und die Datenauswertung, haben also weniger den Datenaustausch in den unteren Schichten des OSI-Referenzmodells im Fokus der Betrachtung, sondern mehr den anschließenden Nutzen. Das Vorhaben BiDa-LAP „Big Data im Landwirtschaftlichen Prozess innovativ nutzen“ [Inst19] beschäftigt sich vor allem mit der Inbetriebnahme und dem Probetrieb eines lokalen Infrastruktursystems, der Aufbereitung und Auswertung von umfassenden Daten sowie der Entscheidungsfindung z. B. der richtigen Maschinenkonfiguration. Das vom BMEL geförderte Verbundprojekt DigiLand [Inst18] wiederum legt den Fokus vor allem darauf, die Grundlage für nationale und internationale Standards sowie die politischen Rahmenbedingungen zu schaffen, welche sich aus der Digitalisierung ergeben.

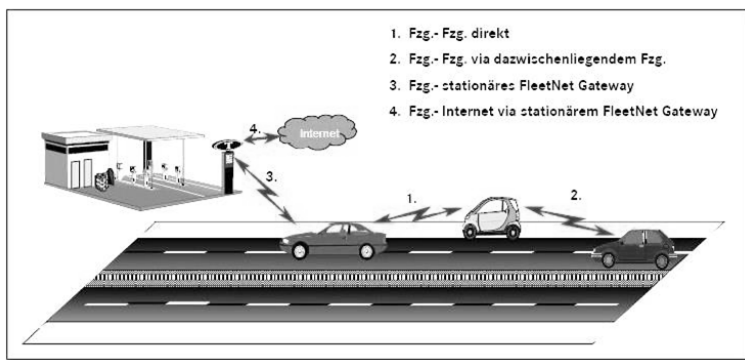
Die Übersicht zeigt, dass sich viele Forschungsprojekte überwiegend mit der Nutzung von Daten für die Optimierung von Geschäftsprozessen beschäftigen, bei denen es i. d. R. nicht auf eine Übertragung der Daten in „Echtzeit“ ankommt und der Datenfluss über ein Infrastrukturnetz, z. B. das Mobilfunknetz, abläuft. Bei der Kommunikation zwischen Maschinen oder Maschinen und Anbaugeräten ist der Schlüssel die Erarbeitung und Verabschiedung eines herstellerübergreifenden Standards, ähnlich wie es mit dem ISOBUS-Standard, für den drahtgebundenen Datenaustausch basierend auf dem CAN-Standard, erarbeitet wurde. Die Agricultural Industry Electronics Foundation e.V. (AEF) hat sich zum Ziel gesetzt, einen solchen Standard für die Maschine zu Maschine (M2M) Kommunikation zu entwickeln, um eine drahtlose Maschinensteuerung zu ermöglichen [Agri19]. In diesem Zusammenhang wird auch eine Zusammenarbeit mit dem Car2Car Konsortium, auf welches im Folgenden noch eingegangen wird, angestrebt.

Ein Blick auf die **Forschungsaktivitäten im Bereich der PKW und Nutzfahrzeuge** zeigt auch hier einen hohen Bedarf an und einen großen Forschungsdrang für unterschiedlichste Kommunikationslösungen. Im Gegensatz zum Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen steht hier vor allem die Informationsweitergabe im Vordergrund, die auch zur Steuerung bzw. Regelung des eigenen Fahrzeugs genutzt werden kann. Die Nutzung der Kommunikation zur wechselseitigen Steuerung von Fahrzeugverbünden gewinnt mit zunehmender Automatisierung in diesem Bereich aber gleichwohl an Bedeutung, z. B. laut dem Verband der Automobilindustrie im Zusammenhang mit Platooning bei Nutzfahrzeugen oder dem intelligenten Straßenverkehr [Verb19]. Die Anforderungen an die Kommunikation aus Sicht



des Platoonings greifen unter anderem auch ALAM [ALAM14] und TURRI [TURR15] auf, die sich im Detail mit den Randbedingungen des Platoonings bei schweren Nutzfahrzeugen auseinandersetzen und Ansätze für ein sicheres und Kraftstoff sparendes System beschreiben.

Von 2000 bis 2003 wurde in einem Konsortium, an dem auch die Technische Universität Braunschweig beteiligt war, untersucht, wie sich Daten zwischen Fahrzeugen unter Nutzung des Mobilfunkstandards UMTS austauschen lassen. Ein Einblick in das Projekt geben ENKELMANN ET AL. [Enke03b], [Enke03a] und FRANZ et al. [FrHM05], aus dem auch nachfolgendes Bild 2.28 entnommen ist und das anschaulich die verschiedenen Kommunikationswege bei Fahrzeuganwendungen aufzeigt.



**Bild 2.28:** Darstellung der vier unterschiedlichen Kommunikationswege bei Fahrzeuganwendungen aus FleetNet [Enke03a]

Hier wird zwischen einer direkten Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation, einer Kommunikation von einem Fahrzeug zu einem anderen Fahrzeug über dazwischenliegende Fahrzeuge, einer Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und einem stationären Gateway und einer Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und dem Internet über das Gateway unterschieden. Als besondere Anforderung ist bei Fahrzeuganwendungen die hohe Mobilität der Kommunikationsteilnehmer (PKW) zu nennen und somit die hohe Dynamik.

Daneben sind verschiedene Projekte wie z. B. „Network on Wheels“ NOW [Frau04], „Sichere und intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland“ simTD [Frau08b] und DRIVE C2X [Frau10] sowie das Vorgängerprojekt PRE-DRIVE C2X [Frau08a] zu nennen, die sich mit dem Datenaustausch zwischen Fahrzeugen – Car-to-Car (C2C) - untereinander und zwischen Fahrzeugen und der Umgebung (C2X), wobei C2C ein Sonderfall von C2X darstellt, beschäftigten. Gemein hatten bzw. haben die Projekte das Ziel einen Informationsaustausch

zu realisieren, um die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen und den Verkehrsfluss zu optimieren, wie es auch in Bild 2.29 grafisch dargestellt ist.



**Bild 2.29:** Aufgabe und Ziele des CAR 2 CAR Konsortiums (nach [Pros19]), Datenaustausch zwischen verschiedenen Fahrzeugen und Fahrzeugen und der Infrastruktur

Neben der eigentlichen Technologienentwicklung ist für die Anwendung im Straßenverkehr mit den verschiedenen Beteiligten die Entwicklung eines herstellerübergreifenden Standards von besonderer Bedeutung. Das CAR 2 CAR Communication Consortium [Pros19] hat sich daher folgendes zum Ziel gesetzt: „The main objective of the CAR 2 CAR Communication Consortium is the development, testing and deployment of cooperative Systems in Europe based on inter-vehicle, vehicle to roadside and vehicle to other road user equipment short-range communication for improving road safety and road efficiency. Other complementary communication like cellular is considered where required.” [Pros19].

Basis für die Kommunikation bildet der aus dem 802.11(a) entwickelte Funkstandard 802.11p, der speziell an die Anforderungen für die Fahrzeug-Fahrzeug und Fahrzeug-Infrastruktur Kommunikation angepasst wurde und im Frequenzband von 5,9 GHz arbeitet. Alternativ dazu bzw. in Ergänzung wurde mit der Normung von *Cellular V2X* (C-V2X) ab 2014 basierend auf 802.11p und ab 2016 basierend auf der Nutzung von LTE, in dieser Kombination als LTE-V2X bezeichnet, begonnen. In der letzten Version ist auch die Einbeziehung des 5G Standards vorgesehen. Als Vorteil wird vor allem der koordinierte

Datenaustausch gesehen, der zu einer höheren Zustellrate führt sowie zu einer höheren Reichweite [5GA17]. Auf Grund der zum Teil sicherheitskritischen Anwendungen (z. B. Notbremsung) sind die Standards nicht frei und nicht für andere Anwendungen nutzbar. FESTAG beschreibt in [Fest15] zusammenfassend die Normung für die Fahrzeugkommunikation und geht dabei sowohl auf den Standard IEEE 802.11p ein wie auch auf Mobilfunklösungen bis hin zu 5G. Wie schon erwähnt ist für IEEE 802.11p ein Frequenzbereich oberhalb des normalen WLAN Frequenzbereichs zwischen 5,85 und 5,925 GHz vorgesehen der gegenüber IEEE 802.11 anstelle von 20 MHz Kanalbreiten nur 10 MHz Kanalbreiten besitzt. Damit kann die Robustheit speziell beim Datenaustausch zwischen Objekten mit hoher Relativgeschwindigkeit zueinander gesteigert werden. Um einen schnellen Verbindungsaufbau zwischen zwei Teilnehmern zu realisieren, die nur für kurze Zeit in gegenseitiger Funkreichweite zueinander sind, verzichtet der p-Standard gegenüber dem Basisstandard IEEE 802.11 auf den Austausch der im Basic Service Set (BSS) vorgesehenen Kontrollinformationen und nutzt anstelle dessen den sogenannten OCB-Modus (Outside the Context of a BSS). In diesem Modus erfolgt der Zugriff auf das Übertragungsmedium bei den Teilnehmern gemäß EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) und baut somit auf dem vorgestellten CSMA/CA Verfahren auf. Bei geringer Auslastung des Netzwerks ermöglicht dies einen schnellen Austausch der Information, da nicht auf eine Freigabe gewartet werden muss. Bei steigender Teilnehmerzahl bzw. höherer Netzlast führt dieses aber, wie im Abschnitt über die Funktionsweise von MANETs beschrieben, zu einem Anstieg von Kollisionen und somit in der Folge zu einem deutlichen Abfall des Datendurchsatzes. Der Ansatz ist somit vor allem für relativ geringe Netzlasten geeignet und für Szenarien in denen wenige Nachrichten versendet werden müssen. Die Entwicklung des Standards ist laut SJOBERG ET AL. [SJOB17] relativ weit fortgeschritten und bietet ein hohes Potential für verschiedene Sicherheits- und Assistenzsysteme bis hin zu höheren Level der Automatisierung. Eine Herausforderung liegt allerdings laut SJOBERG ET AL. in einer angemessenen Marktdurchdringung der Technologie, die auch nach einer Einführung in Neufahrzeugen einige Jahre brauchen wird und erst dann die Vorteile umfänglich zeigt.

## 3 Herleitung der Forschungsfrage

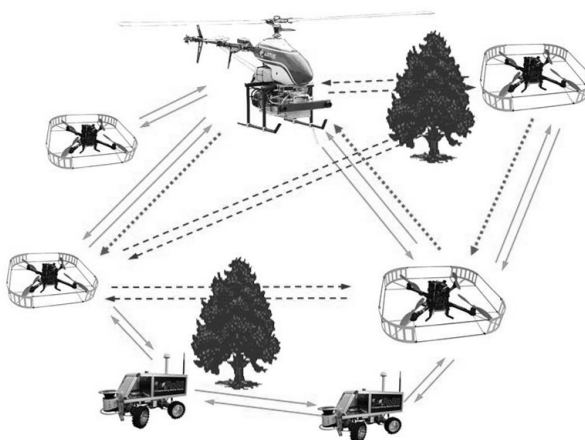
Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Überblick über allgemeine Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gegeben, welcher gleichzeitig auch die enorme Bandbreite an unterschiedlichen Anforderungen für unterschiedlichste Anwendungen aufgezeigt hat. In diesem Kapitel wird auf die speziellen Anforderungen, die die vorgestellte Schwarmpositionierung an die Kommunikation stellt sowie auf die aus dem Stand der Technik und dem Szenario unter Betrachtung der Robustheit abgeleitete Forschungsfrage eingegangen.

### 3.1 Beschreibung des Szenarios

Das im Rahmen des Verbundprojektes NExt UAV „Navigation zur Exploration mit tieffliegenden UAV in Katastrophenszenarien“ betrachtete Szenario sieht den Betrieb von bis zu sechs unbemannten Luft- (UAV) und zwei unbemannten Bodeneinheiten (UGV) zur Exploration eines unbekannten Gebietes vor, mit dem Fokus auf der sicheren Navigation der Einheiten (UXV) sowie der Bestimmung der relativen Position zueinander. Ausgangslage sind Katastrophenszenarien, wie z. B. nach einem Erdbeben oder einem Lawinenunglück, bei denen die vorhandene Infrastruktur teilweise oder vollständig zerstört und somit nicht mehr nutzbar ist. Auch Vorwissen in Form von Karten – sogenannte a priori Informationen – gelten als nicht verfügbar, bzw. als nicht nutzbar. Das Ziel einer schnellen Aufklärung des betroffenen Gebietes schließt somit die genannte Bestimmung der relativen Position der Rettungskräfte in Bezug auf mögliche Verunglückte ein. Unter den vorgegebenen Randbedingungen, die aus dem Projektansatz resultieren, ergibt sich in diesem Ansatz somit nur die Nutzung des global verfügbaren GPS (allg. GNSS) zur Bestimmung der relativen Positionen zueinander. Durch die Rahmenbedingung, die die Verwendung von kleinen mobilen Einheiten vorgibt, ist zudem die Nutzung von hochpräzisen Antennen und hochwertigen Empfängern stark eingeschränkt bzw. nicht möglich. Auch ein langwieriger Aufbau von Infrastruktur, die Einrichtung von zentralen koordinierenden Leitständen etc. wird durch die Randbedingungen ausgeschlossen.

Wie im Kapitel Grundlagen der Satellitenortung 2.4 beschrieben, ist die Genauigkeit solcher Systeme in schwierigem Gelände, bei ungünstigen Satellitenkonstellationen und unter Abschattung nur unzureichend, weswegen der beschriebene Ansatz der Schwarmpositionierung eingesetzt wird. Dieser erfordert wiederum den Austausch aller GNSS Rohdaten zur simultanen Prozessierung der Relativpositionen in einem Verbund, in welchem sich alle Beteiligten frei bewegen können und in dem es ansatzbedingt, wie schon erwähnt, keine koordinierende Instanz gibt, also die in Kapitel 2.3 beschriebenen MANETs. Diese

spezielle Form der Ad-hoc Netzwerke beschreibt unter anderem auch COUCEIRO ET AL. [Couc14] als prädestiniert für den Einsatz bei Such- und Rettungseinsätzen. Die hohe Mobilität der Systeme auf der einen Seite und physikalische Einschränkungen in Punkto Energieverbrauch, Gewicht und Bauraum auf der anderen Seite führen zudem zu starken Schwankungen der Verbindungsqualität bis hin zu Verbindungsabbrissen. Das Gesamtsystem muss in Bezug hierauf robust und fehlertolerant ausgelegt sein, dies gilt sowohl für die eigentliche Kommunikation wie auch die Prozessierung der Daten. Bild 3.1 zeigt ein Beispiel für die möglichen Kommunikationspfade in dem im Forschungsvorhaben verwendeten Verbund mobiler Einheiten. Die Abbildung zeigt sowohl die fliegenden, als auch die bodengebundenen Einheiten. Die verschiedenen Verbindungen sind über Pfeile in unterschiedlichen Linienarten dargestellt. Hindernisse in Form von Gebäuden oder z. B. Bäumen führen in Kombination mit der relativ hohen Dynamik der mobilen Einheiten zu dynamischen Veränderungen der Verbindungen.



**Bild 3.1:** Beispielhafte Kommunikationspfade im Schwarm mobiler Einheiten (durchgezogen = direkte Verbindung, gestrichelt = keine Verbindung, gepunktet = indirekte Verbindung)

Durchgezogene Linien repräsentieren direkte Datenverbindungen, gestrichelte Linien symbolisieren keine direkten Datenverbindungen auf Grund von Hindernissen oder zu großen Entfernungen. Die gepunktete Linie vom UAV rechts oben über das untere UAV zum linken UAV wiederum repräsentiert eine Verbindung über mehrere Zwischenstationen und somit eine sogenannte Multihop-Verbindung.

Zusammengefasst ergibt sich somit eine Reihe von primären Anforderungen an den Datenaustausch, welche wiederum sekundäre Anforderungen für den Datenaustausch zur Folge haben und auf Grund des Ansatzes der Schwarmpositionierung und wegen des Szenarios differenzierbar sind.

Primäre Anforderungen aus dem Ansatz der Schwarmpositionierung heraus:

1. Austausch von GNSS Rohdaten jedes Teilnehmers mit allen anderen Teilnehmern.
2. Austausch spezieller Informationen (z. B. EGNOS Korrekturdaten) einzelner Teilnehmer mit einer Teilgruppe aller Teilnehmer bis hin zu allen Teilnehmern.
3. Austausch aller Informationen eines speziellen Teilnehmers mit einem anderen speziellen Teilnehmer.
4. Datenaustauschrate von möglichst einem Hertz (ausreichende Updaterate der Positionslösung).

Primäre Anforderungen aus dem Szenario heraus:

1. Mindestens acht Teilnehmer.
2. Das Kommunikationssystem muss robust auf Veränderungen und auf den Ausfall einzelner Teilnehmer reagieren.
3. Ausreichende Sendereichweite gemäß des Szenarios – mindestens 100 Meter.

Aus diesen Anforderungen lässt sich wiederum eine Reihe von sekundären Anforderungen ableiten, welche den Bereich des Lösungsraums für den Datenaustausch einschränken. Für den Datenaustausch können somit folgende Anforderungen formuliert werden:

1. Informationen über die Netztopologie müssen mit gleicher Frequenz, in der der Datenaustausch durchgeführt wird, eingeholt bzw. ermittelt werden.
2. Informationen über die Netzqualität müssen im Zuge des 1. Anforderungspunktes mit ermittelt werden, um diese beim Datenaustausch berücksichtigen zu können (direkter Zusammenhang zwischen Signalstärke und Verbindungsqualität).
3. Ausreichende Datenübertragungsrate vorhanden, um die Nutzdaten austauschen zu können (siehe Abschnitt 4.1).
4. Keine zentrale Instanz erforderlich, um die Kommunikation aufzubauen und zu organisieren.
5. Reaktionszeiten (Latenzzeiten) müssen so kurz wie möglich sein, sowohl beim eigentlichen Datenaustausch wie auch speziell beim Aufbau der Kommunikation.

Neben diesen Anforderungen an den Datenaustausch spielt vor allem auch die auszutauschende Datenmenge (Nutzdaten) eine entscheidende Rolle bei der Auswahl einer geeigneten Kommunikationstechnologie, die im Abschnitt 4.1 detaillierter betrachtet und diskutiert wird.

### 3.2 Anforderungen und Robustheit des Kommunikationssystems

Auf Grund des beschriebenen Szenarios und der gegebenen Randbedingungen bestehen verschiedene Anforderungen an das Kommunikationssystem und speziell an die Robustheit des Ansatzes, um zum einen den permanenten Austausch der Rohdaten zu ermöglichen und zum anderen darüber hinaus eine kurze Zeitdauer vom Einschalten der Systeme bis zum operierenden System zu gewährleisten.

Im Einzelnen bedeutet dies, dass das Kommunikationssystem auf Veränderungen der Netztopologie, die durch

- den Ausfall einzelner Teilnehmer,
- das Hinzukommen einzelner Teilnehmer,
- die dynamische Bewegung der Teilnehmer,
- und äußere Störungen der Sende- und Empfangseigenschaften

zu Stande kommen, in geeigneter Weise reagieren kann, um die Gesamtkommunikation idealerweise permanent aufrecht zu erhalten. Somit ist für diese Betrachtung nicht allein die Übertragungsrate des Kommunikationssystems entscheidend, sondern der methodische Ansatz, mit dem die Informationen über die Netztopologie gewonnen bzw. aktuell gehalten werden.

Um die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität des Kommunikationssystems optimal zu nutzen, können verschiedene Routingalgorithmen wie sie in 2.3.4 vorgestellt wurden, genutzt werden. Wie vorgestellt, wird unter dem Begriff Routing verstanden, einen Weg für die Nutzdaten von der Quelle zum Ziel innerhalb einer Netztopologie zu finden, wobei diese Netztopologie ein statisches oder dynamisches Verhalten aufweisen kann.

An dieser Stelle ist nun die Besonderheit des betrachteten Szenarios zu berücksichtigen, dass zu jedem Zeitschritt alle GPS-Rohdaten von allen Teilnehmern mit allen anderen Teilnehmern ausgetauscht werden sollen (vgl. Abschnitt 3.1).

Es wird also nicht nach einer Route von z. B. Teilnehmer 1 zu Teilnehmer 5 gesucht, sondern nach dem optimalen Vorgehen, alle Informationen auszutauschen. Dieses setzt voraus, dass die komplette Netztopologie zu jedem Zeitschritt bei allen Teilnehmern bekannt ist, um eine dezentrale und simultane Ermittlung der notwendigen Schritte zum Datenaustausch durchzuführen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine zentrale Ermittlung der notwendigen Schritte zum Datenaustausch zwar theoretisch denkbar wäre, allerdings erfordert dies zum einen weitere Nachrichten, um die Information wieder an alle Teilnehmer zu verteilen, zum anderen widerspricht es der Anforderung an das System, dass der Ausfall einzelner Teilnehmer problemlos kompensiert werden kann. Bei weitergehender Betrachtung dieser

Randbedingung zeigt sich die Wichtigkeit der robusten Ermittlung der Netztopologie. Liegen ungleiche Informationen über die Topologie bei den einzelnen Teilnehmern als Ausgangsbasis vor, führt dieses in der Folge zu einem ungleichen Ergebnis bei der Ermittlung der notwendigen Schritte für den Austausch der Daten und somit zu einem nicht geordnet ablaufenden Datenaustausch. Das Resultat daraus ist entweder im besten Fall, dass Daten nur nicht übermittelt werden, im ungünstigsten Fall, dass die Kommunikation auf Grund von Störungen wie z. B. Datenkollisionen zusammenbricht und kein Datenaustausch stattfindet.

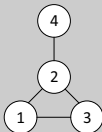
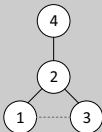
Zur Veranschaulichung soll folgendes - auf einfachen Routingregeln basierendes - Beispiel dienen, nach dem der jeweilige Sender ausgewählt wird. Bei jedem Zeitschritt wird zunächst geprüft, welcher Teilnehmer als potentieller Sender in Frage kommt. Potentieller Sender ist ein Teilnehmer, der Informationen besitzt, die er vorher noch nicht gesendet hat, oder die mindestens einer seiner Nachbarn noch nicht besitzt. Trifft dies auf mehrere Teilnehmer zu, so entscheiden folgende Kriterien, die bei Gleichstand (Verbindungen) nacheinander geprüft werden.

1. Anzahl an Verbindungen
2. Höchste ID (Teilnehmernummer)

Wichtig an diesem Beispiel ist nicht der Algorithmus als solcher, sondern nur das in Tabelle 3.1 gezeigte exemplarische Ergebnis, bei dem es nach dem beschriebenen einfachen Routingregeln zu Datenkollisionen ab dem zweiten Zeitschritt (grau hinterlegt) kommt, wenn für einen Teilnehmer eine andere Topologie bekannt ist als für alle anderen Teilnehmer. In diesem Beispiel besteht das Netz aus vier Teilnehmern und die Tabelle zeigt in der linken Spalte die Netztopologie als Graph und den entsprechenden Datenaustausch in den Zeitschritten aus der Sicht von Teilnehmer 1, 2 und 3 und die rechte Spalte zeigt das Gleiche aus Sicht von Teilnehmer 4. In diesem Beispiel liegt der Unterschied in einer für den Teilnehmer 4 nicht bekannten Verbindung zwischen Teilnehmer 1 und 3 (gestrichelt dargestellt). In den einzelnen Zeitschritten ist der im jeweiligen Zeitschritt aktive Sender angegeben, welche Daten dieser sendet sowie die Daten, die nach Abschluss der Datenübertragung des Zeitschritts bei den jeweiligen Teilnehmern vorliegen. Gibt es keinen Unterschied, sind die Spalten zusammengefasst.



**Tabelle 3.1:** Beispiel dezentrales Routing ungleiche Netztopologien

Zeitschritt	Netz aus Sicht von Teilnehmer 1,2 und 3 und darauf basierende Sendereihenfolge	Netz aus Sicht von Teilnehmer 4 und darauf basierende Sendereihenfolge
		
1	Sender: 2 Gesendetes Datenpaket: 2 Vorliegende Daten bei Teilnehmern: T1: 1,2  T2: 2  T3: 2,3  T4: 2,4	
2	Sender: 3 Gesendetes Datenpaket: 3 T1: 1,2,3  T2: 2,3  T3: 2,3  T4: 2,4	Sender: 4 Gesendetes Datenpaket: 4 T1: 1,2  T2: 2,4  T3: 2,3  T4: 2,4
3	Sender: 1 Gesendetes Datenpaket: 1 T1: 1,2,3  T2: 1,2,3  T3: 1,2,3  T4: 2,4	Sender: 3 Gesendetes Datenpaket: 3 T1: 1,2  T2: 2,3,4  T3: 2,3  T4: 2,4
4	Sender: 4 Gesendetes Datenpaket: 4 T1: 1,2,3  T2: 1,2,3,4  T3: 1,2,3  T4: 2,4	Sender: 1 Gesendetes Datenpaket: 1 T1: 1,2  T2: 1,2,3,4  T3: 2,3  T4: 2,4
5	Sender: 2 Gesendetes Datenpaket: 1 T1: 1,2,3  T2: 1,2,3,4  T3: 1,2,3  T4: 1,2,4	
6	Sender: 2 Gesendetes Datenpaket: 3 T1: 1,2,3  T2: 1,2,3,4  T3: 1,2,3  T4: 1,2,3,4	
7	Sender: 2 Gesendetes Datenpaket: 4 T1: 1,2,3,4  T2: 1,2,3,4  T3: 1,2,3,4  T4: 1,2,3,4	

Diese Kollision kann nach dem im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Problem der Hidden Stations nicht durch die üblichen Ansätze erkannt werden, sodass es zu einem Informations- bzw. Datenverlust kommt, womit der gesamte Datenaustausch nicht mehr wie vorgesehen durchgeführt werden kann.

Für die Robustheit ist es somit entscheidend, durch den Kommunikationsansatz als solches schon dafür Sorge zu tragen, dass die gleichen Informationen über die Netztopologie bei allen Teilnehmern zu jedem Zeitpunkt vorliegen.

Ein weiterer zu diskutierender Aspekt ist die Zuverlässigkeit der eigentlichen Datenübertragung und inwiefern diese besonders betrachtet werden muss. Angenommen, es lägen zum Zeitpunkt X innerhalb eines Zeitschritts die gleichen Informationen bzgl. der

Netztopologie bei allen Teilnehmern vor und alle Teilnehmer berechneten simultan und dezentral das gleiche Vorgehen für den Datenaustausch. Käme es nun noch innerhalb dieses Zeitschritts zu Veränderungen der Netztopologie durch die Bewegung der einzelnen Teilnehmer oder durch eine andere Störung, die einen Einfluss auf die Verbindungen hätte, so könnte der Datenaustausch für diesen Zeitschritt nicht planmäßig erfolgen.

Mögliche Szenarios:

- Eine oder mehrere Verbindungen bestehen nicht mehr:  
In der Folge kommen einzelne Datenpakete nicht bei Teilnehmern an, können nicht weitergeleitet und auch nicht für die Relativpositionierung im Schwarm genutzt werden.
- Eine oder mehrere Verbindungen bestehen zusätzlich:  
In der Folge kann es zu Datenkollisionen kommen mit dem Ergebnis eines teilweise gestörten Datenaustauschs und einer nicht vollständig durchführbaren Relativpositionierung im Schwarm.

Das klassische Routing sieht im Falle einer Störung einer Verbindung vor, die durch z. B. eine fehlende Bestätigung des Empfängers erkannt wird, einen alternativen Übertragungsweg zu ermitteln. Allerdings macht dieses besonders dann Sinn, wenn eine zwingende Zustellung des Datenpakets notwendig ist, um den Gesamtdatensatz nicht zu korrumpieren.

Im betrachteten Szenario der Relativpositionierung im Schwarm mit einer hohen angestrebten Updaterate von einem Hertz ist es für das Gesamtkonzept jedoch nicht zwingend erforderlich in jedem Zeitschritt einen vollständigen Datenaustausch zu erreichen. Wichtiger ist es vielmehr über den gesamten Einsatzzeitraum aktuelle Daten auszutauschen, als dafür zu sorgen, alle Daten ausgetauscht zu haben. Eine Rückmeldung der einzelnen Teilnehmer über den erfolgreichen Datenempfang scheint somit nur bedingt sinnvoll, da dieses zusätzliche Nachrichten bedeuten würde, die in der Folge den vorgesehenen Datenaustausch stören und ebenfalls die Datenübertragungsrate zusätzlich erhöhen.

### 3.3 Formulierung der Forschungsfrage

In den vorangegangenen Abschnitten 3.1 und 3.2 wurden das Gesamtszenario mit den daraus folgenden Anforderungen und die Robustheit des erforderlichen Kommunikationssystems betrachtet und diskutiert. Gegenüber gebräuchlichen Kommunikationssystemen, die im Abschnitt Grundlagen der Ad-hoc-Netzwerke vorgestellt wurden, und im Unterschied zu den typischen mobilen Ad-hoc-Netzen (vgl. 2.3.2), liegt die Besonderheit in diesem speziellen Fall darin, dass ein Kommunikationssystem benötigt wird, das ohne einen Koordinator einen hochfrequenten Austausch von Daten in einem hochdynamischen Anwendungsszenario

ermöglicht. Sowohl die Auswahl einer die Anforderungen erfüllenden Technologie als auch die Vorbetrachtungen zeigen, dass die wesentliche Herausforderung in der genannten hochdynamischen, hochfrequenten und dezentralen Erkundung der Netztopologie liegt und von keinem der vorgestellten Algorithmen und Technologien vollumfänglich erfüllt werden kann (vgl. Kapitel 5.1). Somit ergibt sich die zentrale Frage, ob und wie sich ein Kommunikationssystem realisieren lässt, das diese Anforderungen erfüllt und in der Praxis – unter den gegebenen Randbedingungen - umsetzbar ist. Die allgemein formulierte Frage lautet demzufolge:

**Wie lässt sich in einem dynamischen mobilen Ad-hoc-Netz unter den genannten speziellen Randbedingungen ein zuverlässiger Austausch von GNSS-Rohdaten realisieren?**

Da, wie diskutiert und erörtert, die besondere Herausforderung an dieser Stelle bzw. die Schlüsselfrage zunächst darin besteht, das Problem der Netzerkundung zu lösen, lässt sich die für das Gesamtsystem primär zu beantwortende Frage daher wie folgt formulieren:

**Wie lässt sich in einem dynamischen mobilen Ad-hoc-Netz unter den genannten Randbedingungen eine zuverlässige Netzerkundung realisieren?**

Als sekundäre Frage schließt sich daran an, wie aufbauend auf diesen Informationen ein Gesamtsystem aussehen muss, um die aus der Schwarmpositionierung und aus dem Szenario hervorgehenden Anforderungen zu erfüllen und wie dieses mit der Netzerkundung in Einklang zu bringen ist. Die Betrachtung grenzt sich somit von vielen anderen Untersuchungen spezieller Routingprotokolle (vgl. 2.3.4) in der Form ab, als dass es sich zum einen nicht um die oftmals rein simulative Untersuchung von Routingalgorithmen handelt und zum anderen dadurch, dass der für den eigentlichen Datenaustausch erste Schritt des Routings, die Erkundung der möglichen Datenübertragungspfade, sprich die Netzerkundung, im Fokus der Betrachtung liegt.

Im Vorgriff auf Kapitel 5.1, in dem der Lösungsraum noch einmal eingeschränkt und diese Einschränkung diskutiert wird, lässt sich die Forschungsfrage weiter konkretisieren zu der wesentlichen Forschungsfrage:

**Lässt sich mit Hilfe des Funkstandards 802.15.4 in einem dynamischen mobilen Ad-hoc-Netz unter den genannten Randbedingungen ein zuverlässiger Austausch von GNSS-Rohdaten (Datenaustauschrate 1 Hertz) realisieren?**

## 4 Material und Methode

Dieses Kapitel beginnt mit einer Darstellung der verwendeten Materialien, wobei zunächst auf die aus den Nutzdaten resultierenden Anforderungen eingegangen wird. Darauf aufbauend erfolgt eine Beschreibung der Auswahl und der Implementierung des Kommunikationsmoduls, das als Basis für die Methode zum Datenaustausch dient. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung der methodischen Vorgehensweise, die dieser Arbeit zu Grunde liegt.

### 4.1 Definition der Nutzdaten und der daraus resultierenden Anforderungen

Als primäre Nutzdaten werden die auszutauschenden GNSS-Rohdaten definiert, die vom verwendeten GPS-Empfänger vom Typ  $\mu$ -blox LEA 6T [ublo13] ausgegeben werden. Diese werden um sekundäre Nutzdaten ergänzt, wozu z. B. Statusdaten bzgl. der Verfügbarkeit von EGNOS/SBAS zählen und weitere Statusdaten zum Zustand des Systems. Bild 4.1 zeigt das verwendete GNSS-Modul auf einer entsprechenden Trägerplatine, mit der für den Betrieb notwendigen Peripherie und einer Kantenlänge von ca. fünf Zentimetern wie es im genannten Forschungsvorhaben vom IFF aufgebaut wurde ([HeBe13], S. 75–76).

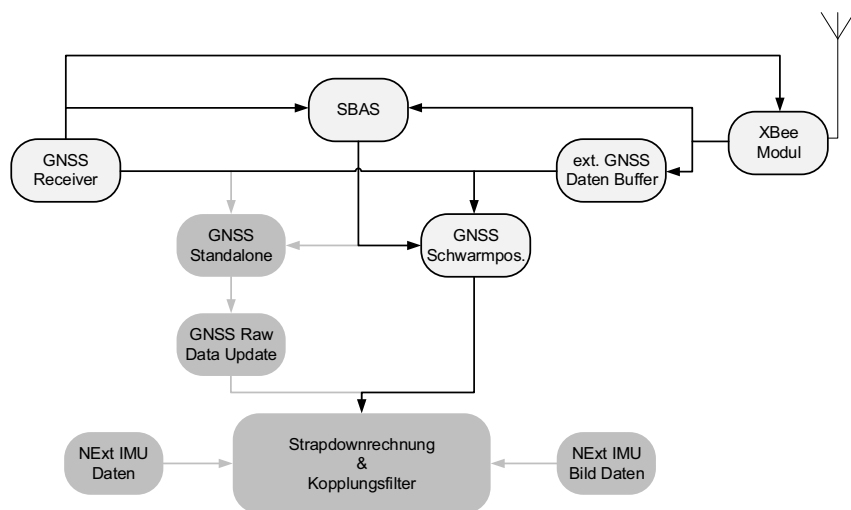


**Bild 4.1:**  $\mu$ -blox LEA 6T GPS Empfänger auf Trägerplatine (nach [HeBe13], S. 75)

Maßgeblich für die Anforderungen an die Nutzdaten ist der schon im Abschnitt 2.4.4 vorgestellte Ansatz der Schwarmpositionierung, auf den an dieser Stelle noch einmal in Bezug auf die Anforderungen an den Datenaustausch eingegangen wird. Der vom Institut für Flugführung entworfene Ansatz basiert auf dem Austausch und der Prozessierung von GPS Code Messungen, mit dem Ziel, sowohl die absolute Position jedes einzelnen Rovers als auch die relativen Positionen aller Schwarmteilnehmer zueinander zu bestimmen.

Dieser Ansatz wurde in das am IFF bestehende eigenentwickelte Navigationsframework TriPos integriert und für den GNSS-Rohdatenaustausch im Schwarm ein Protokoll entworfen,

das die vom GPS Empfänger empfangenen Rohdaten aufbereitet und an die Kommunikationssoftware übermittelt. Bild 4.2 zeigt die entwickelte Struktur und den Datenfluss für die GPS basierte Schwarmpositionierung. Jedes einzelne System verfügt über einen GPS Receiver, dessen Rohdaten sowohl für eine GPS Standalone Lösung verwendet werden wie auch für die GPS Schwarmpositionierung. Die für die Schwarmpositionierung notwendigen Daten, bei denen es sich in erster Linie um die Pseudorangemessungen der einzelnen verfügbaren Satelliten handelt sowie um die dazugehörigen Kovarianzen, werden in einem Datenspeicher gesammelt und der Schwarmpositionierung zugeführt. Ebenfalls können lokale oder, wenn diese nicht verfügbar sind, ggf. über den Schwarm geteilte Korrektur-Daten (z. B. SBAS) für die Berechnungen hinzugezogen werden. Entscheidend für die Kommunikation ist nur der hellgrau eingefärbte Teil des im Bild dargestellten Diagramms mit den schwarzen Verbindungspfeilen [Beck13].



**Bild 4.2:** Struktur und Datenfluss GNSS Schwarmpositionierung (nach [HeBe13], S. 52)

Der Inhalt eines Datensatzes, also entsprechend für einen Satelliten, setzt sich wie in Tabelle 4.1 gezeigt zusammen. Je nach verfügbarer Anzahl empfangbarer Satelliten, wobei sich dieses in der Praxis beim Satellitennavigationssystem GPS auf ca. zwölf Satelliten beschränkt und in der Regel zwischen vier und zehn Satelliten liegt, multipliziert sich die Datenpaketgröße mit der Satellitenzahl. Zusätzlich zu den in der Tabelle gezeigten Nutzinformationen wird das Datenpaket noch um einen Header ergänzt, welcher sechs Byte groß ist und eine eindeutige Zuordnung erlaubt. Insgesamt ergibt sich damit eine Paketgröße von 55 Byte, wobei der

Header allerdings für den eigentlichen Rohdatenaustausch nicht relevant ist und somit von 49 Byte pro Nutzdatenpaket ausgegangen werden kann.

Für den Extremfall von zwölf empfangenen Satelliten ( $\text{Satellitenanzahl}_{\max}$ ) ergibt sich damit nach folgender Rechnung

$$\text{Rohdatenpaket}_{\max} [\text{byte}] = \text{Nutzdatenpaket} [\text{byte}] \cdot \text{Satellitenanzahl}_{\max} \quad (4.1)$$

$$\text{Rohdatenpaket}_{\max} [\text{byte}] = 49 \text{ byte} \cdot 12 = 588 \text{ byte} \quad (4.2)$$

eine maximale Größe eines Rohdatenpakets pro Rover, die zu übertragen ist, von 588 Byte.

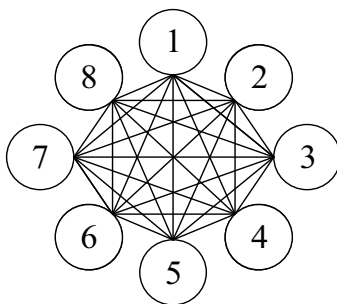
Als weitere direkte Einflussgröße an die Anforderung an die Datenübertragung geht die Datenaustauschrate ein, die zunächst mit 1 Hertz als Wunschanforderung angenommen wird.

**Tabelle 4.1:** Zusammenstellung Datensatz Rohdatenaustausch

Bezeichnung	Erklärung	Bytes
Time	Zeitstempel Messung	8
PRN	Eindeutige Bezeichnung der Signalkodierung bzw. eines Satelliten	1
Status	Zustand Satellit	4
Pseudorange (PSR)	Laufzeitmessung Signal [m]	8
Accumulated Doppler Range (ADR)	Range	8
Standardabweichung PSR	Standardabweichung zur PSR-Messung	4
Standardabweichung ADR	Standardabweichung zur ADR-Messung	4
Doppler	Frequenz	4
Signal to noise Ratio	Rauschverhältnis	4
Locktime	Zeit wie lange der Satellit valide ist und nutzbare Werte liefert	4

Für eine einfache überschlägige Abschätzung der minimalen notwendigen Datenübertragungsrate wird an dieser Stelle eine einfache Netztopologie betrachtet, bei der bei einer maximalen Anzahl an Teilnehmern die maximale Rohdatenmenge ausgetauscht werden soll und alle Teilnehmer in direkter Sende- und Empfangsreichweite zueinander

stehen. Folglich muss jeder Teilnehmer theoretisch genau einmal Daten senden, damit alle Teilnehmer alle Daten empfangen. Den entsprechenden Graphen dieser Netztopologie zeigt Bild 4.3 und somit den günstigsten Fall für einen anzunehmenden Datenaustausch in Bezug auf die benötigte Datenübertragungsrate.



**Bild 4.3:** Graph zu vollvermaschtem Netz mit acht Teilnehmern

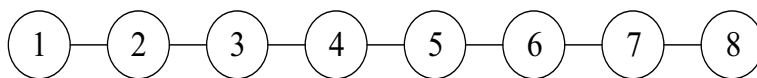
In dieser einfachen Netztopologie und unter Vernachlässigung von Reservezeiten, Datenoverheads etc. ergibt sich eine benötigte minimale netto Datenübertragungsrate nach folgender Rechnung:

$$\begin{aligned} \text{Datenübertragungsrate}_{\min} \left[ \frac{\text{byte}}{\text{s}} \right] &= \\ &= \text{Rohdatenpaket}_{\max} [\text{byte}] \cdot \text{Sendungsanzahl} \cdot \text{Datenaustauschrate} [\text{Hz}] \quad (4.3) \end{aligned}$$

$$\text{Datenübertragungsrate}_{\min} [\text{byte/s}] = 588 [\text{byte}] \cdot 8 \cdot 1 [\text{Hz}] \quad (4.4)$$

von 4.704 Byte pro Sekunde. Umgerechnet in die gebräuchliche Angabe der Datenübertragungsrate in Bit pro Sekunde [bit/s] ergeben sich somit rund 37.600 bit/s als minimale Anforderung an die benötigte Datenübertragungsrate.

Die maximale Anforderung an die Datenübertragungsrate beschreibt bei gleichen Bedingungen die als Graph in Bild 4.4 dargestellte Netztopologie, bei der jeder Kommunikationsteilnehmer immer nur zu zwei, bzw. an den „Enden“ der sogenannten Linientopologie, nur zu einem Nachbarn eine Verbindung besitzt.



**Bild 4.4:** Graph zu Netz mit acht Teilnehmern mit minimalen direkten Verbindungen

Damit die Rohdaten von Teilnehmer 1 bei allen Teilnehmern vorliegen, müssen diese siebenmal gesendet werden, von Teilnehmer 1, 2, 3, 4, 5, 6 und 7. Gleiches gilt für die Daten von Teilnehmer 8, womit sich aufsummiert 14 Sendungen ergeben. Für Teilnehmer 2 und 7 reduziert sich die Anzahl der notwendigen Sendungen auf jeweils sechs um die Rohdaten zu verteilen, gleiches gilt für Teilnehmer 3, 4, 5 und 6, insgesamt also 36 Sendungen. Für den kompletten Datenaustausch werden in diesem Ungünstigsten aller Fälle also 50 zeitlich aufeinander folgende Sendungen benötigt, womit sich nach Formel (4.3) eine benötigte Datenübertragungsrate<sub>max</sub> von 29.400 Byte pro Sekunde, also 235.200 bit/s ergibt.

Als Anforderung aus Sicht der Datenübertragungsrate ergibt sich somit ein Kommunikationssystem, welches zwischen 37.600 bit/s und 235.200 bit/s übertragen können muss, wobei schon anzumerken ist, dass dieses eine permanente Übertragung von Daten voraussetzen würde, also einem Tastgrad – eine Auslastung - von 100 Prozent.

## 4.2 Auswahl und Implementierung des Kommunikationsmoduls

Beim Aufbau der Versuchsträger musste bei der Auswahl der Kommunikationshardware neben der Erfüllung der Anforderungen in Bezug auf Rechenleistung etc. vor allem darauf geachtet werden, die Beschränkungen hinsichtlich Gewicht und Energieverbrauch, aber auch des benötigten Bauraums, speziell bei den Quadroptern, einzuhalten.

Die Mindestanforderungen an die Kommunikationshardware leiten sich teils aus den theoretischen Vorbetrachtungen, teils aus den Spezifikationen der vorhandenen UXV und teils aus den Anforderungen an das Kommunikationskonzept ab. Nachfolgende Tabelle 4.2 zeigt die wichtigsten Anforderungen, die Art der Anforderung, den Wert sowie den Ursprung der Anforderung.

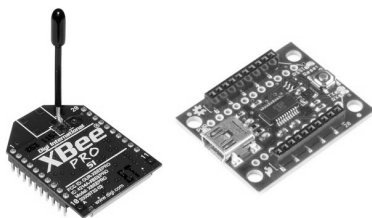
**Tabelle 4.2:** Anforderungsliste für Kommunikationsmodul

Anforderung	Art	Wert	Ursprung
Ad-hoc Fähigkeit	F	ja	Kommunikationskonzept
Gewicht	M	< 20 g	UAV Pelikan
Reichweite	M	> 100 m	Forschungsvorhaben



Anforderung	Art	Wert	Ursprung
Datenübertragungsrate	M	> 115 kbit/s	GNSS Rohdatenaustausch (Kapitel 4.1)
Teilnehmerzahl	M	$n \leq 8$	Forschungsvorhaben
Energieverbrauch	W	Gering, < 5 W	UAV Pelikan
Spannung	W	< 12 V	UAV
Kosten	W	< 100 € pro Modul	Projektbudget
Bauraum	W	< 2x2x5 cm	UAV Pelikan
Bauform	W	Fertigmodul	Gesamtsystemkonzept
Latenzzeit	W	< 10 ms	Kommunikationskonzept
Ansteuerbarkeit	W	Direkt	Kommunikationskonzept
Schnittstelle	W	RS232, USB, I <sup>2</sup> C, CAN	Gesamtsystemkonzept
Frequenz	W	Freies ISM Band, z. B. 868 MHz, 2,4 GHz	Forschungsvorhaben

Basierend auf der Anforderungsliste wurden Funkmodule des Herstellers Digi International Inc. vom Typ XBP24-AWI-001 beschafft (Bild 4.5, links) sowie passende Trägerplatinen (Bild 4.5, rechts), die sowohl die Energieversorgung als auch eine Kommunikationsschnittstelle über eine USB-Schnittstelle bereitstellen und zur ersten Inbetriebnahme dienen.



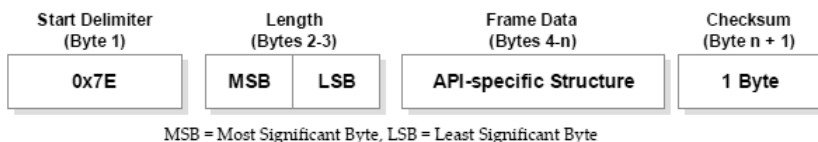
**Bild 4.5:** Funkmodul XBee Pro und Trägerplatine

Herstellerseitig verfügen die gewählten Module über zwei unterschiedliche Möglichkeiten des Nachrichtenaustauschs, welche im Detail in der Produktbeschreibung ausführlich aufgeführt sind (vgl. [Digi12]). An dieser Stelle werden nur die wichtigsten Eigenschaften kurz zusammenfassend wiedergegeben.

Im ersten Modus **Transparent Operation** bilden zwei Funkmodule eine virtuelle serielle Verbindung ab. An jedem XBee-Modul kann ein Mikrocontroller oder ein anderes Gerät, welches über eine serielle Schnittstelle (UART) verfügt, angeschlossen werden und die Daten werden als asynchrones Signal vom Sender zum Empfänger bidirektional übertragen. Für die eigentliche Funkübertragung werden die seriellen Daten von den Modulen zu Datenpaketen zusammengefasst und zwischengespeichert. In diesem Operationsmodus ist nur der Datenaustausch zwischen zwei Funkmodulen möglich und es werden keine weiteren Informationen über die Verbindungsqualität etc. per Nachricht übermittelt.

Der zweite Modus **API Operation** bietet wesentlich mehr Möglichkeiten und basiert auf Frames, sodass zu übermittelnde Informationen in definierten Nachrichtenrahmen verpackt werden. In diesem Modus können Informationen u. a. zielgerichtet an bestimmte Teilnehmer oder auch an alle (Unicast/Multicast) verschickt, Statusinformationen abgefragt werden und es besteht die Möglichkeit, Informationen über die Signalstärke beim Empfang auszuwerten, aus der sich Rückschlüsse auf die Verbindungsqualität ziehen lassen. Zudem ist jede Nachricht mit einem Datenkopf versehen, dem u. a. die ID des Absenders zu entnehmen ist.

Der Aufbau der Frames folgt folgendem in Bild 4.6 gezeigtem Schema:



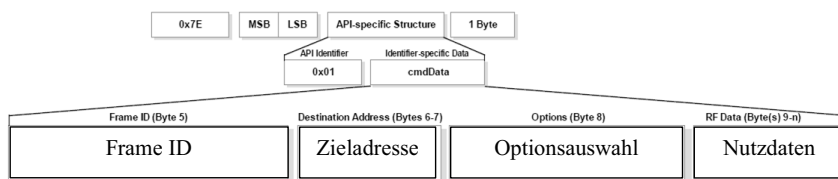
**Bild 4.6:** Aufbau API Frame ([Digi12], S. 57)

Nach einem ein Byte großem Start Trennzeichen *0x7E* folgt in zwei Bytes kodiert die Länge des Frames, anschließend der eigentliche Inhalt des Frames *API-specific Structure* und abschließend die Checksum wiederum in einem Byte kodiert.

Insgesamt gibt es 13 verschiedene API Typen, wovon die relevantesten nachstehend aufgeführt und das TX Request und RX Packet exemplarisch erläutert werden:

- Modem Status:                      0x8A                      Statusinformationen abfragen
- AT Command:                      0x08                      Module Parameter abfragen oder setzen
- AT Command Response            0x88                      Antwort auf AT Command
- TX Request: 16-bit address        0x01                      Nachrichtenversand

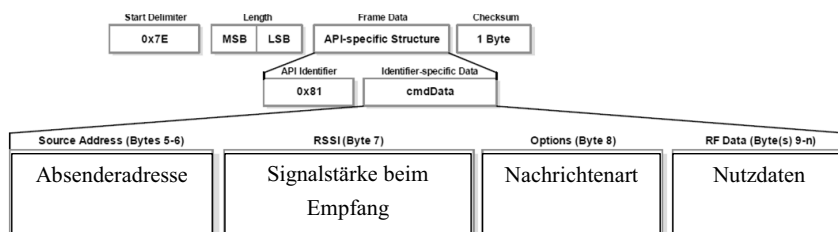
Den detaillierten Aufbau des TX Request Frames zeigt Bild 4.7, bei dem sich der eigentliche Inhalt des Frames wie dargestellt zusammensetzt.



**Bild 4.7:** Aufbau API TX (Transmit) Request 16-bit (nach [Digi12], S. 60)

- TX Status: 16-bit address 0x89 Status zum TX Request
- RX Packet: 16-bit address 0x81 Nachrichteneingang

Der Aufbau des RX Frames ist in Bild 4.8 dargestellt. Es besteht aus der Absenderadresse, der gemessenen Signalstärke, einem Statusbyte mit Informationen über die Art der Nachricht und den eigentlichen Daten.



**Bild 4.8:** Aufbau API RX (Receive) Packet 16-bit (nach [Digi12], S. 62)

Die Module verfügen zudem über einen umfangreichen **AT Commands** Parametersatz, über den sich verschiedenste Eigenschaften wie z. B. die Sendeleistung, die Identifikationsnummer und auch das Sendeverhalten anpassen lassen. Von Bedeutung für die prototypische Umsetzung sind die in nachstehender Tabelle aufgeführten Befehle, die über das vorgenannte AT Command `0x08` gesetzt bzw. gelesen werden.

**Tabelle 4.3:** Relevante AT Command Befehle

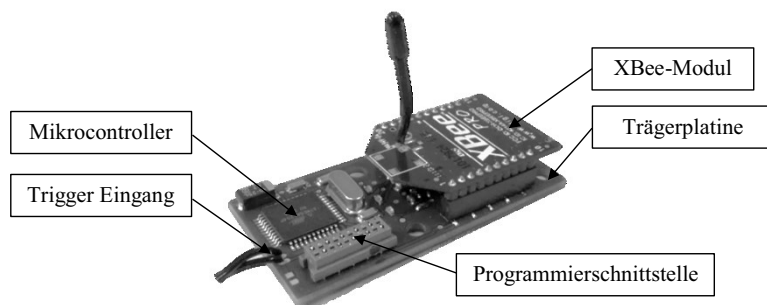
AT Command	Kurzbezeichnung	Beschreibung	Wertebereich Parameter
MY	16-bit Source Adress	Setzen/Lesen der 16-bit Adresse des Moduls (Wenn nicht gesetzt, ist nur die 64-bit Adresse ( $\neq$ Seriennummer) aktiv und gültig)	0-0xFFFF

AT Command	Kurzbezeichnung	Beschreibung	Wertebereich Parameter
RN	Random Delay Slots	Setzen/Lesen des back-off Exponenten für den CSMA-CA Algorithmus (vgl. 2.3.2)	0-3
CH	Channel	Setzen/Lesen des RF Kanals Frequenz = $2.405 + (CH-11) * 5$ MHz	0x0C-0x17 (XBee-Pro)
PL	Power Level	Setzen/Lesen der Sendeleistung	0-4
BD	Interface Data Rate	Setzen/Lesen der Datenrate der Schnittstelle	0-7 (standard rates) 0x80-0x3D090 (non –standard rates)
WR	Write	Speichern der gesetzten Parameter im nicht flüchtigen Speicher	

Für die Auswahl der Funkmodule waren, vor allem auf Grund der geringen Payload der im Projekt verwendeten Quadropten vom Typ Pelikan, eine geringe Masse sowie eine relativ geringe Energieaufnahme entscheidend. Für das Kommunikationskonzept wiederum stand vor allem die geringe Latenzzeit für den Verbindungsaufbau im Fokus sowie eine hardwarenahe Ansteuerbarkeit. Die als Minimalanforderung definierte Datenübertragungsrate basiert auf der abgeschätzten Datenmenge im Abschnitt 4.1.

Für die experimentelle Erprobung wurden insgesamt zehn Funkmodule angeschafft. Es handelt sich um fünf vom Typ XBP24-ASI-001 mit RPSMA-Antennenanschluss sowie fünf XBP24-AWI-001 mit Drahtantenne. Für die Module mit RPSMA-Antennenanschluss wurden zusätzlich passende Antennen besorgt. Es handelt sich um handelsübliche Rundstrahlantennen ohne nennenswerte Richtcharakteristik. Diese wurden in den UGV und in ARTIS verbaut, wohingegen die Module mit den Drahtantennen aus Gewichtsgründen auf den UAV Typ Pelikan verbaut wurden. Es handelt sich um die internationale Variante mit einer erhöhten Sendeleistung von 63 mW bzw. +18 dBm Sendeleistung. Die in Europa maximale Sendeleistung von +10 dBm muss über einen Parameter eingestellt werden.

Für den Betrieb der Funkmodule wurde eine eigene Trägerplatine entwickelt, die neben der Energieversorgung des Moduls auch die Datenverarbeitung und die Ansteuerung des Funkmoduls übernimmt. Bild 4.9 zeigt die selbstentwickelte Trägerplatine mit einem gesockelten XBee Pro Modul.



**Bild 4.9:** XBee-Modul auf selbstentwickelter Trägerplatte mit Hauptbestandteilen

Nachfolgende Auflistung fasst die Anforderungen zusammen die basierend auf den Erkenntnissen der Untersuchungen an die Trägerplatte gestellt wurden.

- Energieversorgung für XBee-Modul
- Schnittstelle RS232 zu XBee-Modul
- Datenschnittstelle zu NAV-Rechner RS232/USB
- Trigger Eingang zur Synchronisierung
- Mikrocontroller zur Datenverarbeitung und Ansteuerung des XBee-Moduls
  - ausreichend Speicher zum Zwischenspeichern der Rohdaten
  - ausreichende Rechenleistung (Taktzahl)

Die Platine wurde in Anlehnung an kommerziell erhältliche Trägerplatten entworfen, verfügt jedoch im Gegensatz zu diesen über einen eigenen Mikrocontroller zur echtzeitnahen Ansteuerung des Funkmoduls, der Datenverarbeitung und Zwischenspeicherung.

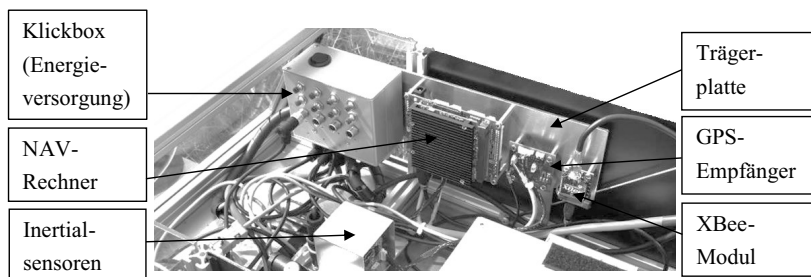
- Datenschnittstelle zu NAV-Rechner – realisiert über USB und FTDI zur Pegelanpassung mit Status LEDs (TX und RX)
- ATMEGA1284P [Atme15] mit notwendiger Beschaltung
- Spannungsversorgung Mikrocontroller und XBee-Modul – realisiert über USB und Spannungswandler 5V zu 3,3V
- XBee-Modul bzw. entsprechende Kontakte
- Programmierschnittstelle
- Status LEDs (Funkaktivität, Power)

Der dazugehörige Schaltplan mit den sechs Kernbestandteilen ist im Anhang A dargestellt.

Die Programmierung des ATMEGA1284p erfolgt in der Programmiersprache C, in der es viele Standardbibliotheken gibt. Als Entwicklungsumgebung dient WinAVR (Version 201000110) und als Editor das Programmer's Notepad (Version 2.0.8.718). Die

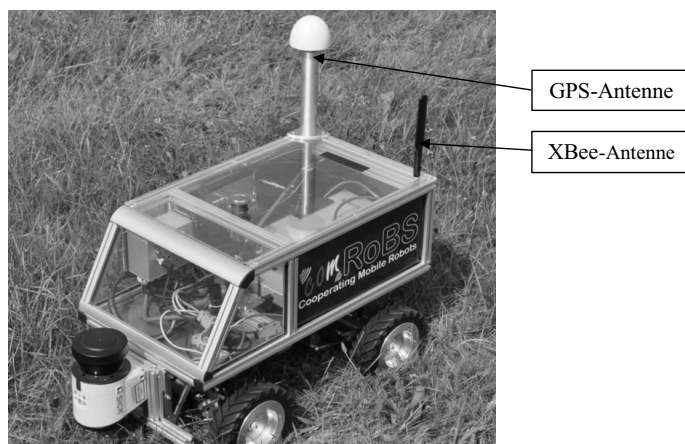
Programmierung erfolgt über die SPI-Schnittstelle des Mikrocontrollers mit Hilfe eines USB ISP-Programmer der Firma DIAMEX GmbH.

Für die Integration der Funkhardware sowie zur Befestigung der Rechnerhardware und des GPS-Empfangsmoduls ist eine zusätzliche Trägerplatte im Innenraum der Versuchsträger comRoBS installiert (Bild 4.10). Die Inertiale Messeinheit ist fest mit der Karosserie des Rovers verschraubt, um Vibrationen soweit wie möglich zu reduzieren. Da die Rechen- und Sensorhardware für die im Projekt stattfindenden Untersuchungen unabhängig von der technischen Ausstattung der Versuchsträger ist, ist keine Datenverbindung zwischen dem Steuerungssystem des Rovers und dem Navigationsrechner vorgesehen.



**Bild 4.10:** Detailansicht comRoBS mit integrierter Next UAV Hardware

Bild 4.11 zeigt den Gesamtaufbau der Versuchsplattform comRoBS. Im Bild zu sehen sind die extern angebrachten Antennen für den GPS-Empfang und das Kommunikationsmodul. Die Energieversorgung der Next UAV Hardware erfolgt jeweils über das Bordnetz der Versuchsträgers und ggf. zusätzliche DC/DC-Wandler. Die Energieversorgung der Kommunikationsmodule erfolgt über die USB-Schnittstelle, über die auch der Datenaustausch mit dem NAV-Rechner erfolgt.



**Bild 4.11:** Außenansicht comRoBS mit integrierter NExt UAV Hardware und Antennen

### 4.3 Methodisches Vorgehen

Um die hergeleitete Forschungsfrage zu beantworten, wird ein System zum Austausch der GNSS-Rohdaten in einem Verbund von UAV und UGV konzeptioniert, theoretisch und simulativ untersucht, prototypisch umgesetzt und in realen Versuchen erprobt. Ziel dabei ist es in Feldversuchen die GNSS-Rohdaten für eine anschließende Weiterverarbeitung zur Schwarmpositionierung auszutauschen.

Im Rahmen der Konzepterstellung werden zunächst die Anforderungen an die Kommunikation zusammengetragen und mittels einer umfangreichen Recherche mit möglichen technischen Lösungen abgeglichen, um ein Konzept für den Datenaustausch zu entwickeln. Dabei werden Gesamtsystemlösungen, Algorithmen bzw. Protokolle und Hardwarekomponenten in Form von Funkmodulen betrachtet.

Anschließend wird basierend auf dem Konzept im Rahmen einer theoretischen Betrachtung iterativ eine Methode entwickelt. Hierzu werden sowohl erste praktische Laborversuche wie auch simulative Voruntersuchungen durchgeführt, um theoretische Annahmen zu bestätigen.

Die Überprüfung der Eignung der Methode für verschiedene Netztopologien und Teilnehmerzahlen erfolgt im Anschluss zunächst simulationsbasiert. Darüber hinaus wird untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Verlustraten von einzelnen Nachrichten haben und wie robust der methodische Ansatz ist. Begleitet werden die simulativen Untersuchungen, wie schon bei der Konzepterstellung, von experimentellen Laborversuchen zur Ermittlung

von bestimmten Eigenschaften der favorisierten Hardware, z. B. von Übertragungs- und Verarbeitungszeiten. Diese wiederum werden als Parameter in der Simulation berücksichtigt.

Die theoretisch und simulativ validierte Methode wird im Anschluss unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Gesamtsystemkonzepts prototypisch umgesetzt. Dazu wird ein Softwarekonzept für die ebenso entwickelten Trägerplatten für die Kommunikationsmodule entworfen und von begleitenden Versuchen implementiert.

Während der methodische Ansatz in losgelösten und überwiegend simulativen Betrachtungen untersucht werden kann, erfolgt die experimentelle Erprobung eng verzahnt mit den Forschungsarbeiten u. a. zur Schwarmpositionierung am IFF. Diese wiederum benötigen die ausgetauschten Rohdaten und konzentrieren sich auf die Algorithmen zur Berechnung der Positionslösungen und die Kopplung mit weiteren Sensordaten.





## 5 Theoretische Betrachtungen und simulative Untersuchungen

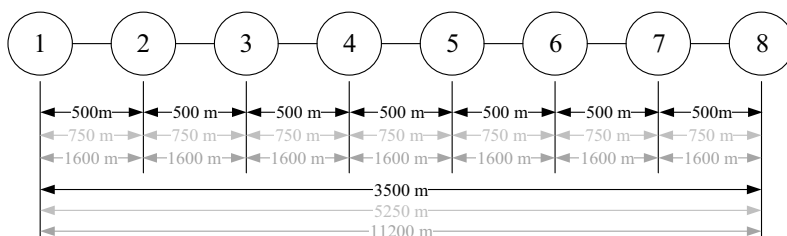
Im ersten Abschnitt dieses Kapitels erfolgt zunächst eine Diskussion über die Einschränkung des Lösungsraums in Bezug auf die zu untersuchende Technologie für den Datenaustausch. Anschließend wird die Fragestellung untersucht wie eine sichere Information über die Netztopologie gewonnen und gewährleistet werden kann und somit die Kernfrage dieser wissenschaftlichen Ausarbeitung, während sich der letzte Abschnitt dieses Kapitels darauf aufbauend der Frage des eigentlichen Austauschs der Rohdaten widmet.

### 5.1 Diskussion zur Einschränkung des Lösungsraums

Der Funkstandard 802.15.4 zeichnet sich, wie in Abschnitt 2.3.1 zusammenfassend beschrieben, vor allem durch seinen geringen Energieverbrauch, kostengünstige Hardware und die Nutzung der lizenzfreien ISM-Bänder aus. Zudem sind Fertigmodule verschiedener Hersteller, mit unterschiedlichen Standardschnittstellen (UART, SPI, TWI), kleinen Baugrößen und niedrigem Gewicht sowie unterschiedlichen Antennenanschlüssen, als integrierte Lösung am Markt verfügbar. Darüber hinaus zeichnet sich dieser Standard durch im Vergleich zu anderen Lösungen, z. B. dem 802.11 Standard – WLAN –, sehr niedrige Latenzen und gegenüber dem 802.15.1 Standard – Bluetooth – deutlich größerer Funkreichweite von ca. 750 Metern bei der internationalen Variante mit 10 Milliwatt Sendeleistung ([Digi12], S. 5) aus. Infrastrukturnetze wie z. B. auch das Mobilfunknetz scheiden aus der Betrachtung auf Grund des Szenarios aus, da diese nicht zuverlässig an allen Einsatzorten verfügbar sind. Die für die C2X-Kommunikation vorgesehenen Standards 802.11p bzw. LTE-V2X (zukünftig auch Einbindung der 5G-Technologie) kommen nicht in Betracht, da diese zum einen nicht auf die zentrale Anforderung eines vollständigen Datenaustauschs ausgerichtet sind, zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Arbeit noch nicht verfügbar waren und auch nicht frei nutzbar sind. Zudem weisen diese, wie am Ende von Kapitel 2.5 erläutert, Schwächen in Situationen auf, wenn viele Nachrichten gleichzeitig verschickt werden sollen.

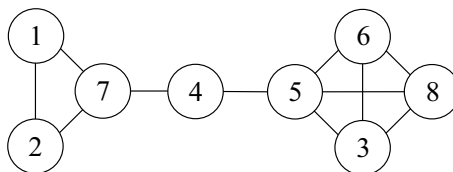
Eine wesentliche Einschränkung des 802.15.4 Standards liegt in der verfügbaren Datenrate der Radiofrequenz (RF Datenrate), die je nach verwendetem Frequenzband zwischen 20 kbit/s im Frequenzbereich von 868-868,6 MHz und einer Bandbreite von 300 kHz bis zu 250 kbit/s brutto RF Datenrate im Frequenzband im Bereich 2400-2483,5 MHz mit einer Bandbreite von 2 MHz liegt. Im Standard [IEEE11] sind weitere Frequenzbänder und Datenraten vorgesehen, unter anderem eine RF Datenrate von 250 kbit/s im Frequenzband von 868-868,6 MHz,

jedoch sind diese nicht oder nur sehr eingeschränkt als Fertigmodule verfügbar. Basierend auf der im Abschnitt 4.1 vorgenommenen Abschätzung bzgl. der notwendigen maximalen Datenrate liegt diese für den ungünstigsten Fall bei 235 kbit/s und damit nur knapp unterhalb der maximalen brutto RF Datenrate des Funkstandards. Die eigentliche Nutzdatenrate liegt allerdings bei lediglich 115,2 kbit/s. Für den ungünstigsten Fall ist somit davon auszugehen, dass gerade einmal die Hälfte aller Daten ausgetauscht werden könnten. Allerdings ist dieser Fall wiederum von der Anwendungsseite betrachtet äußerst unwahrscheinlich. Dieser Fall würde eine Anordnung der maximalen Anzahl von Teilnehmern, also acht Teilnehmer, in einer Perlenschnur (siehe Bild 5.1) bedeuten und somit bei einer Sende- und Empfangsreichweite von 750 Metern, auch bei einer konservativen Betrachtung mit nur 500 Metern zwischen den einzelnen Teilnehmern, einen Abstand von Teilnehmer 1 bis zum Teilnehmer 8 von 3500 Metern (siehe Bild 5.1), bei 750 Metern Funkreichweite sogar 5250 Meter und unter Nutzung der max. Sendeleistung (63 mW, nur in den USA zulässig, Reichweite ca. 1600m) sogar rund 11 Kilometer.



**Bild 5.1:** Ausdehnung Netz mit acht Teilnehmern in Linientopologie (Perlenschnur)

Eine vermutlich häufiger vorkommende Anordnung zeigt Bild 5.2. Für dieses Beispiel werden insgesamt 28 Sendeslots zum vollständigen Datenaustausch benötigt. Somit müssen bei einer Anzahl von zwölf Satelliten pro Teilnehmer (588 Byte pro Teilnehmer, vgl. Formel (4.2)) insgesamt 16.464 Byte ausgetauscht werden, wofür wiederum eine Datenrate von 131,7 kbit/s nötig wäre. Bei z. B. realistischeren acht Satelliten pro Teilnehmer reduziert sich dieser Wert auf 87,8 kbit/s. Ohne an dieser Stelle ins Detail zu gehen, liegt es bei der beispielhaften Netztopologie zudem nahe, parallele Datensendungen durchzuführen, wenn die Teilnehmer keinen gemeinsamen Nachbarn haben und somit die benötigte Zeit für einen Gesamtdatenaustausch bzw. den notwendigen Datendurchsatz zu senken.



**Bild 5.2:** Ausdehnung teilvermaschtes Netz mit acht Teilnehmern

Unter der Annahme einer mittleren benötigten Bandbreite, die in erster Abschätzung in der rechnerischen Mitte zwischen den beiden Extremwerten (37,6 kbit/s und 235 kbit/s) liegt und somit gerundete 136 kbit/s beträgt, und unter Einbeziehung der benötigten Bandbreite aus dem zuletzt betrachteten Szenario (87,8 kbit/s), erscheint die verfügbare maximale Nutzdatenrate für die meisten Fälle somit ausreichend, sodass dieser Ansatz weiter betrachtet werden kann.

## 5.2 Theoretische Betrachtungen zur Netzerkundung

Die Breite der Lösungsmöglichkeiten, die in Kapitel 2.3.4 vorgestellt wurde, lässt sich unter Zuhilfenahme der beschriebenen Randbedingungen und Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1) insofern einschränken, als dass nur ein proaktives System in Frage kommt, um das Netz zu erkunden. Die Begründung hierfür liegt in der hohen Wahrscheinlichkeit von Veränderungen zwischen zwei Zeitschritten und darin, dass für alle Zeitschritte alle Verbindungen bekannt sein müssen.

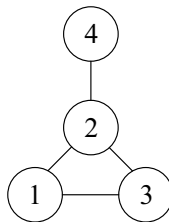
Basierend darauf stellt sich die Frage, ob zu jedem Zeitschritt das gesamte Netzwerk neu erkundet werden muss (engl. full dump) oder ob es ein besserer Ansatz ist, nach Veränderungen zu suchen und diese zu korrigieren (engl. incremental dump). Eine erneute Betrachtung des Szenario mit bis zu acht dynamisch agierenden Teilnehmern und der damit verbundenen hohen Wahrscheinlichkeit von Veränderungen der Netztopologie führt zu dem Ergebnis, dass es sinnvoller ist, einen Ansatz zu untersuchen, mit jedem Zeitschritt ohne Vorwissen zu starten, als eine aufwendige Überprüfung der Netztopologie des letzten Zeitschritts durchzuführen und dann gegebenenfalls einen Großteil der Topologie neu zu erkunden mit folgender Begründung: Alle Teilnehmer sind zu jedem Zeitschritt in den Datenaustausch eingebunden. Somit müssen sämtliche Verbindungen zu jedem Zeitschritt überprüft werden und das Ergebnis der Überprüfung wiederum an alle Teilnehmer verteilt werden. Somit ist immer das gesamte Netzwerk betroffen und die Überprüfung der bekannten Topologie geht vom Aufwand in eine Neuerkundung über.

Übrig bleibt damit die Frage nach der Art und Weise wie die Netzerkundung durchzuführen ist. Grundsätzlich kann hier nach zwei Prinzipien unterschieden werden, dem

- Zufallsprinzip und dem
- Regelbasiertem Prinzip,

wobei sich beide Prinzipien weiter untergliedern lassen. Eine entscheidende Frage ist, ob und wie ein Abbruchkriterium für die Netzerkundung definiert werden kann, da auf Grund der Randbedingungen lediglich die maximale Anzahl an Teilnehmern feststeht, nicht jedoch welche zu dem jeweiligen Zeitpunkt aktiv sind. Ebenso kann es im Rahmen des Szenarios zur zeitweisen Aufteilung des Gesamtnetzes in zwei oder mehr Teilnetze, bestehend aus einer Untermenge der Gesamtteilnehmerzahl, kommen, womit ein Kriterium „Teilnehmerzahl“ ausscheidet. Ein weiterer Ansatz ist die Überprüfung der Adjazenzmatrizen auf Symmetrie. Aber auch dieses Kriterium scheidet bei genauerer Betrachtung aus, da auf Grund unterschiedlicher Sende- und Empfangseigenschaften der Kommunikationshardware gerichtete Verbindungen möglich sind, die zu einer nicht symmetrischen Adjazenzmatrix führen.

Eine theoretische Betrachtung für das prinzipielle Vorgehen für eine Netzerkundung basierend auf dem **Zufallsprinzip** erfolgt auf der in Bild 5.3 dargestellten einfachen und somit anschaulichen Netztopologie.



**Bild 5.3:** Beispielnetz für Netzerkundung nach dem Zufallsprinzip mit vier Teilnehmern

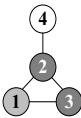
Nach einem gemeinsamen Trigger durch z. B. das PPS-Signal der GPS-Receiver [ublo13] starten alle Teilnehmer damit, ihre eigene individuelle Kennung, z. B. ihre Identifikationsnummer (ID) auszusenden. Wird vom Sendemodul eine drohende Datenkollision erkannt (vgl. CSMA/CD), bricht es die Übertragung ab, wartet eine zufällige Zeit (vgl. Abschnitt 2.3.2) und versucht erneut eine Übertragung der Daten. Hat ein Teilnehmer einmal seine Information gesendet, wird dieser erst dann wieder aktiv, wenn von diesem neue Informationen empfangen werden. Auch hier tritt das Problem der Hidden Station auf, z. B. wenn im dargestellten Netz Teilnehmer 4 und z. B. Teilnehmer 3 gleichzeitig senden. Konkret hat dies zur Folge, dass bei Teilnehmer 2 keine Daten empfangen werden, da es zu einer

Störung durch eine Überlagerung der Nachrichten kommt. Zufällige Wartezeiten verringern das Risiko von Datenkollisionen, führen aber gleichzeitig auch zu einer langen Zeitdauer, um die Netzerkundung komplett abzuschließen. Das Problem der Hidden Station wiederum kann im Extremfall dazu führen, dass die Netzerkundung versiegt und es zu keiner erfolgreichen Netzerkundung kommt. Durch eine Modifikation des Vorgehens dahingehend, dass jeder Teilnehmer seine eigene ID auch ohne neue Informationen nach einer bestimmten Zeit erneut versendet, kann dieses Problem abgeschwächt werden, es bleibt aber ein gewisses Restrisiko und führt ggf. zu unnötigen Nachrichtensendungen.

Eine weitere Möglichkeit, um den Verlust von Nachrichten zu vermeiden, besteht darin, die Nachrichten mit einer fortlaufenden Nachrichtennummer zu versehen, diese zu überwachen und ggf. fehlende Nachrichten nachzufordern. Mit zunehmender Teilnehmerzahl steigt jedoch die Anzahl der zusätzlich erforderlichen Nachrichten. Damit verbunden kommt es wiederum mit zunehmender Teilnehmerzahl vermehrt zu einem Anstieg an Nachrichtenkollisionen, sodass die Anzahl der Nachrichten wiederum ebenfalls stark ansteigt, was zu weiteren Nachrichtenkollisionen führt, sodass das Netz schlussendlich „zusammenbricht“ bzw. die Zeitdauer der Netzerkundung sehr stark ansteigt. Jegliche Art von Maßnahmen zur Vermeidung von Datenkollisionen (vgl. CSMA/CD) führt demzufolge zu einem starken Anwachsen der benötigten Zeitspanne.

Vorherbestimmt dagegen sind **regelbasierte Prinzipien**. Ein mögliches Vorgehen wird im Folgenden basierend auf dem Beispielnetz aus Bild 5.3 erläutert. Die Erkundung startet ebenfalls über das PPS-Signal des GPS-Receivers. Im Gegensatz zum vorherigen Vorgehen sendet jeder Teilnehmer zu einem von seiner eigenen ID abhängigen vorgegebenen Zeitpunkt (z. B.  $\text{Zeitpunkt}_{\text{ID}} = \text{ID} \cdot t_{\text{TZ}}$  mit  $\text{ID} = \{0; 1; 2; 3; \dots; N\}$  und  $t_{\text{TZ}} = 5$ ) alle zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen über die Netztopologie, z. B. die Adjazenzmatrix. Da immer nur ein Sender vorhanden ist, treten keine Datenkollisionen auf. Für dieses Beispiel zeigen die Tabellen 5.1 (bestehend aus 5.1a, 5.1b, 5.1c und 5.1d) den vorherbestimmten Ablauf. Dargestellt ist jeweils die Adjazenzmatrix der Teilnehmer zum Zeitpunkt des Sendens, also mit den Informationen aus dem vorangegangenen Zeitschritt (Takt). Der Sender ist jeweils in Mittelgrau in der Spalte Takt hervorgehoben, die Daten empfangenden Teilnehmer in Dunkelgrau.

**Tabelle 5.1a:** Beispiel zeitschrittbasierte Netzerkundung (Takt 1, Sender 1, Sender mittelgrau, Empfänger dunkelgrau)

Takt: 1	Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmer 4
Sender: 1				
				
	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
	4	4	4	4

Wie Tabelle 5.1a zeigt, liegen im ersten Zeitschritt bei allen Teilnehmern noch keine Informationen vor, die Adjazenzmatrizen enthalten somit keine Einträge. Sender ist Teilnehmer 1 (mittelgrau) und Empfänger sind die benachbarten Teilnehmer 2 und 3 (dunkelgrau).

Tabelle 5.1b zeigt den zweiten Zeitschritt, in dem Teilnehmer 2 der Sender ist und die Daten aus dem ersten Zeitschritt vorliegen. Bei den Teilnehmern 2 und 3 ist jeweils markiert (x), dass Daten von Sender 1 empfangen wurden, wobei die Lesart derart ist, dass in der Kopfzeile die Empfänger stehen und in der Vorspalte die Sender. Dementsprechend für Teilnehmer 2 zu lesen: Teilnehmer 2 hat Daten von Teilnehmer 1 empfangen.

**Tabelle 5.1b:** Beispiel zeitschrittbasierte Netzerkundung (Takt 2, Sender 2, x = bestehende Verbindung, dunkelgrau = neu markierte Verbindung)

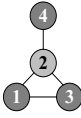
Takt: 2	Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmer 4
Sender: 2				
				
	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
	1	1 x	1 x	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
	4	4	4	4

Tabelle 5.1c zeigt den dritten Zeitschritt mit Teilnehmer 3 als Sender. Die Daten aus dem zweiten Zeitschritt sind in die Adjazenzmatrix eingetragen. In diesem Fall hat Sender 2 im vorangegangenen Zeitschritt seine Matrix (vgl. Bild 5.4) gesendet, also die aus der Matrix lesbare Information, dass Daten von Sender 1 empfangen wurden.

	1	2	3	4
1		x		
2				
3				
4				

**Bild 5.4:** Adjazenzmatrix Teilnehmer 2 zum Zeitschritt 2 mit nur einer bekannten Verbindung zwischen Teilnehmer 2 und Teilnehmer 1 (x = bestehende Verbindung, dunkelgrau = neu markierte Verbindung)

Diese Information findet sich in der Tabelle 5.1c wieder und wird im Folgenden für jeden Teilnehmer nachfolgend exemplarisch erläutert.

- Teilnehmer 1 hat von Teilnehmer 2 die in Bild 5.4 gezeigte Information erhalten, dass Teilnehmer 2 Daten von sich (also Teilnehmer 1) erhalten hat und trägt diese in die eigene Matrix ein (schwarze Markierung) genauso wie die Information, dass er selbst Daten von Teilnehmer 2 Empfangen konnte (dunkelgrau Markierung).
- Teilnehmer 2 hat weiterhin nur die Information Daten von Teilnehmer 1 empfangen zu haben. Da Teilnehmer 2 Sender gewesen ist, gibt es keine neuen Informationen.
- Teilnehmer 3 hatte im zweiten Zeitschritt schon Daten von Teilnehmer 1 empfangen und dieses in die Matrix eingetragen (mittelgrau Markierung). Im jetzt dritten Zeitschritt kommt mit dem Empfang der Daten von Teilnehmer 2 die Information dazu, dass Teilnehmer 2 Daten von Teilnehmer 1 empfangen kann (schwarze Markierung) sowie die Eintragung selbst auch Daten von Teilnehmer 2 empfangen zu können (dunkelgraue Markierung).
- Für Teilnehmer 4 stellt es sich ähnlich dar wie für Teilnehmer 1. Zum einen wird die in der Adjazenzmatrix übermittelte Information „Teilnehmer 2 empfängt von Teilnehmer 1“ eingetragen (schwarze Markierung), zum anderen die nun neue Information, Daten von Teilnehmer 2 empfangen zu können (dunkelgraue Markierung).



**Tabelle 5.1c:** Beispiel zeitschrittbasierte Netzerkundung (Takt 3, Sender 3, x = Verbindung, schwarz = übermittelte, dunkelgrau = neu erkannte, mittelgrau = bekannte Verbindung)

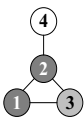
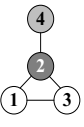
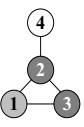
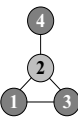
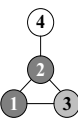
Takt: 3	Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmer 4
Sender: 3				
				
	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
	4	4	4	4

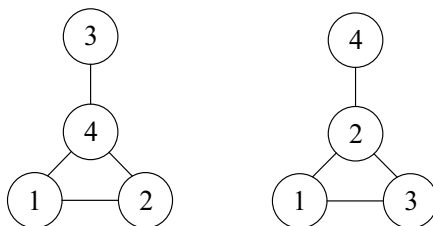
Tabelle 5.1d zeigt die nächsten Schritte, die sich nach dem gleichen Schema ergeben. In diesem Beispiel liegt bei allen Teilnehmern nach sechs Zeitschritten die gleiche Adjazenzmatrix, die die Netztopologie beschreibt, vor. Zur besseren Nachvollziehbarkeit sind die Veränderungen zwischen dem letzten und dem aktuellen Zeitschritt jeweils mittelgrau markiert.

**Tabelle 5.1d:** Beispiel zeitschrittbasierte Netzerkundung (Takt 4-7, Sendereihenfolge: Sender 4-1-2-3, x = Verbindung, mittelgrau = Veränderungen bei den bekannten Verbindungen)

Takt: 4	Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmer 4
Sender: 4				
				
	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
	4	4	4	4
Takt: 5				
Sender: 1				
				
	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
	4	4	4	4

<b>Takt: 6</b> <b>Sender: 2</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x				4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x	x			4			x		<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x				4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x		2					3				x	4				
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x																																																																																																							
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x	x																																																																																																						
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x																																																																																																							
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x																																																																																																					
2																																																																																																								
3				x																																																																																																				
4																																																																																																								
<b>Takt: 7</b> <b>Sender: 3</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x	x			4			x		<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x	x			4			x		<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x	x			4			x		<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1			x	x	2	x			x	3	x	x			4			x	
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x	x																																																																																																						
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x	x																																																																																																						
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x	x																																																																																																						
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1			x	x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3	x	x																																																																																																						
4			x																																																																																																					

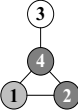
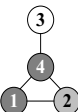
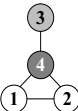
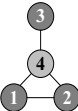
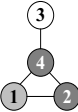
Schon eine kleine Veränderung der Anordnung der Teilnehmer (vgl. Bild 5.5) führt zu einem anderen Ergebnis (vgl. Tabelle 5.2) und zeigt somit, dass dieses Vorgehen stark abhängig von der Netztopologie ist.

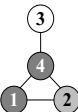
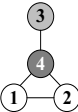
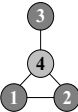
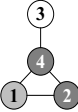


**Bild 5.5:** Modifiziertes Netz mit vier Teilnehmern (links), ursprüngliches Netz (rechts)

Anstelle von sechs Zeitschritten wie im vorangegangenen Beispiel werden acht Zeitschritte benötigt, bis bei allen Teilnehmern die vollständige Adjazenzmatrix vorliegt. Auf eine Beschreibung der einzelnen Schritte wird an dieser Stelle verzichtet, die Markierungen sind analog zu der Beschreibung von Tabelle 5.1 vorgenommen und können entsprechend nachvollzogen werden.

**Tabelle 5.2:** Beispiel zeitschrittbasierte Netzerkundung bei Variation der Netztopologie vgl. Bild 5.5 (Takt 1-9, Sendereihenfolge: Sender 1-2-3-4-1-2-3-4-1, x = Verbindung, mittelgrau = Veränderungen bei den bekannten Verbindungen)

Takt:	Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmer 4																																																																																																				
<b>Takt: 1</b> <b>Sender:1</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4				
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
<b>Takt: 2</b> <b>Sender:2</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x			2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1				x	2					3					4				
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x																																																																																																						
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1				x																																																																																																				
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
<b>Takt: 3</b> <b>Sender:3</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x			2	x				3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x			2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3					4				
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x																																																																																																						
2	x																																																																																																							
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x																																																																																																						
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3																																																																																																								
4																																																																																																								
<b>Takt: 4</b> <b>Sender:4</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x			2	x				3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x			2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1					2					3					4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4				
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x																																																																																																						
2	x																																																																																																							
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x																																																																																																						
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1																																																																																																								
2																																																																																																								
3																																																																																																								
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4																																																																																																								
<b>Takt: 5</b> <b>Sender:1</b> 	<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>4</th><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x				<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>4</th><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4	x				<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4					<table border="1"> <tr><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr> <tr><th>1</th><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>2</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>3</th><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><th>4</th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4				
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x																																																																																																							
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x																																																																																																							
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4																																																																																																								
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4																																																																																																								

Takt:	Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmer 4																																																																																																				
<b>Takt: 6</b> <b>Sender: 2</b> 	<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x				<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x			<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4			x		<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x			
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x																																																																																																							
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x																																																																																																						
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x																																																																																																							
<b>Takt: 7</b> <b>Sender: 3</b> 	<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x			<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x			<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4			x		<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x		
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x																																																																																																						
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x																																																																																																						
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x																																																																																																						
<b>Takt: 8</b> <b>Sender: 4</b> 	<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x			<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x			<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2				x	3				x	4			x		<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x	x	
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x																																																																																																						
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x																																																																																																						
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2				x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4			x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x	x																																																																																																					
<b>Takt: 9</b> <b>Sender: 1</b> 	<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x	x		<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x	x		<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x	x		<table> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>x</td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td>x</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td></td></tr> </table>		1	2	3	4	1		x		x	2	x			x	3				x	4	x	x	x	
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x	x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x	x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x	x																																																																																																					
	1	2	3	4																																																																																																				
1		x		x																																																																																																				
2	x			x																																																																																																				
3				x																																																																																																				
4	x	x	x																																																																																																					

Eine Extrapolation dieses Ergebnisses auf ein Netz mit acht Teilnehmern unter Berücksichtigung der Tatsache, dass basierend auf den Rahmenbedingungen das Netzwerk aus einer Teilnehmerzahl  $n$  mit

$$n \in N \text{ mit } N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} \quad (5.1)$$

bestehen kann, ergibt eine Vielzahl von Lösungen für die Anzahl der benötigten Zeitschritte.

Neben der prinzipiellen Eignung des Ansatzes, die mit der theoretischen Betrachtung gezeigt wurde, ist zu ermitteln, welche Zeitspanne benötigt wird, um eine Erkundung des Netzes auf

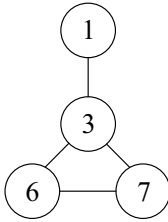
diese Weise durchzuführen und ob diese mit der Zeitspanne, die für den eigentlichen Austausch der Rohdaten erforderlich ist, vereinbar ist.

Hierzu ist es zunächst notwendig zu ermitteln wie lange es dauert, eine Nachricht von einem Teilnehmer zu einem anderen Teilnehmer zu senden und welchen Einfluss die Größe des **Datenpakets** darauf hat.

Die brutto RF Datenrate der ausgewählten Funkmodule ist im Datenblatt [Digi12], [Digi14] mit 250 kbit/s angegeben, allerdings ist der reale Datendurchsatz von vielen Faktoren (z. B. der Modulationsart) abhängig, weicht somit von der theoretischen RF Datenrate ab und wird mit ca. 115,2 kbit/s angegeben. Neben der reinen Übertragungszeit müssen zudem Zeiten für die Verarbeitung der Daten einkalkuliert werden, welche wiederum von der Leistung der angeschlossenen Recheneinheit (Personal Computer, Mikrocontroller, etc.) abhängen.

Da die maximale Teilnehmerzahl auf acht Teilnehmer festgelegt ist, bietet es sich unter diesen Randbedingungen an, die Adjazenzmatrix mit acht Bytes zu übertragen: Jedes Byte entspricht dabei einer Zeile der Adjazenzmatrix und die acht Bit eines Bytes repräsentieren wiederum die einzelnen Spalten (siehe Tabelle 5.3).

**Tabelle 5.3:** Beispiel zum Schema der Kodierung der Adjazenzmatrix

		Empfänger								Bit kodiert	Byte kodiert (little endian)
		0	1	2	3	4	5	6	7		
	Sender	0								00000000	0
		1			x					00010000	8
		2								00000000	0
		3		x				x	x	01000011	194
		4								00000000	0
		5								00000000	0
		6				x			x	00010001	136
		7				x		x		00010010	72

Insgesamt werden somit acht Bytes benötigt, um die in der Abbildung dargestellte Adjazenzmatrix zu speichern. Die theoretische Übertragungszeit  $t_{\text{theo}}$  ohne Berücksichtigung von Datenoverheads für Header etc. beträgt somit nach folgender Rechnung

$$t_{\text{theo}} = \frac{64 \text{ bit}}{115,2 \text{ kbit/s}} = 0,00055 \text{ s} = 0,55 \text{ ms} \quad (5.2)$$

nur ca. eine halbe Millisekunde. Für die in der Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 gezeigten Beispielnetze, bei denen die Erkundung im siebten bzw. neuntem Takt abgeschlossen ist, beträgt die theoretische Zeit zur Erkundung, ohne die Berücksichtigung von Bearbeitungszeiten etc. bei optimaler Ausnutzung der Übertragungskapazität und ohne jegliche Leerzeiten, somit zwischen 3,85 und 4,95 Millisekunden. Um diese theoretischen Werte zu bestätigen bzw. die unbekannten Zeiten zu ermitteln, wurden Vorversuche zur Ermittlung der Übertragungszeit durchgeführt. Hierzu wurde ein Laboraufbau bestehend aus zwei Funkmodulen vom Typ XBee-PRO S1 (siehe Abschnitt 4.2) und einem GPS-Modul zur Zeitsynchronisierung sowie die notwendige Peripherie aufgebaut. Für die Messungen wurde ein Datensatz mit einem Zeitstempel versehen, von einem Funkmodul zum anderen versendet, die Differenz zwischen Sende- und Empfangszeit ermittelt und dieser Wert ausgegeben.

Abweichend von der theoretischen Abschätzung ergibt sich eine gemessene Zeit  $t_{\text{Ümess}}$  von ca. sieben Millisekunden. Eine Erklärung dafür liegt darin, dass bei der theoretischen Übermittlungszeit nicht alle Zeitfaktoren berücksichtigt wurden. Nachfolgende Auflistung zeigt die einzelnen Schritte für eine Datenübertragung.

- Bearbeitungszeit für das Codieren der Daten als Nachrichtenframe
- Übermittlung der Daten über serielle Schnittstelle auf Senderseite
- Bearbeitungszeit im Funkmodul auf Senderseite
- Reine Übertragungszeit „in der Luft“ ( $\approx t_{\text{Ütheo}}$ )
- Bearbeitungszeit im Funkmodul auf Empfängerseite
- Übermittlung der Daten über Serielle Schnittstelle auf Empfängerseite
- Bearbeitungszeit für das Decodieren der Daten aus Nachrichtenframe

Ebenso wurde bei  $t_{\text{Ütheo}}$  der Datenoverhead nicht berücksichtigt, der unter anderem dem Aufbau des Nachrichtenframes (Adresse, Länge, Nutzdaten, Checksum, etc.) geschuldet ist und nach dem Protokoll (vgl. Kapitel 4.1) 9 Byte umfasst. Gegenüber der theoretischen Übertragungszeit wurde das Protokoll zudem um weitere acht Nutzdatenbytes ergänzt, um eine zusätzliche Qualitätsmatrix zu übertragen, die basierend auf einem Schwellenwert für die Signalstärke für jede Verbindung in zwei Stufen die Verbindungsqualität differenziert, sowie um weitere zwei Byte pro Teilnehmer, um die zum jeweiligen Zeitschritt vorhandene Rohdatenmenge für den Datenaustausch zu übermitteln. Zusammen mit einem dem Nutzdatenpaket vorangestellten Byte, welches die ID des Absenders enthält, ergeben sich somit 33 Nutzdatenbytes. Die angepasste theoretische Übertragungszeit berechnet sich somit nach Formel 5.3

$$t_{\text{Ütheo}} = \quad (5.3)$$

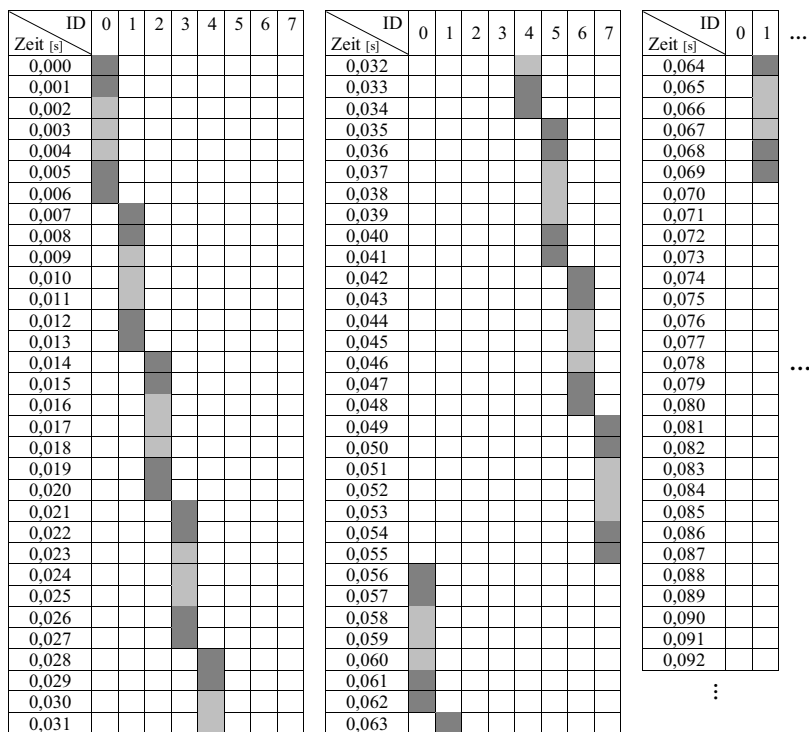
$$\frac{72 \text{ bit (Frame)} + 8 \text{ bit (ID)} + 16 \text{ bit (Rohdatenmenge)} + 64 \text{ bit (Adj. -Matrix)} + 64 \text{ bit (Q. -Matrix)}}{115,2 \frac{\text{kbit}}{\text{s}}}$$

zu 1,9 Millisekunden. Zusammen mit den aus praktischen Messungen ermittelten Übermittlungs- und Verarbeitungszeiten ergibt sich daraus folgender überschlägiger Zusammenhang, der sich aus einem fixen Zeitanteil und einem von der Datenmenge variablen Zeitanteil zusammensetzt und sich über die nachfolgende lineare Gleichung annähern lässt:

$$t_{\text{Üang}} = \frac{72 \text{ bit} + \text{Nutzdatenbytes} \cdot 8}{115,2 \text{ kbit/s}} + 5 \text{ ms} = \sim 7 \text{ ms} \quad (5.4)$$

Für eine optimale Ausnutzung der Übertragungskapazität und eine Minimierung der benötigten Zeit zur Netzerkundung basierend auf diesem Ansatz gilt es die Belegungszeit des Übertragungsmediums zu optimieren. Dargestellt sind in Bild 5.6 zum einen die während einer Netzerkundung hochlaufenden diskreten Zeitschritte von jeweils einer Millisekunde (von 0-31 Millisekunden links, 32-63 Millisekunden mittig und 64 etc. rechts), daneben jeweils in einer Spalte die einzelnen Teilnehmer (ID 0-7). In Dunkelgrau markiert ist die ermittelte Zeit, die benötigt wird, um die Daten zu verarbeiten und zwischen Mikrocontroller und XBee-Modul zu übertragen, in Mittelgrau die Zeit in der die Daten drahtlos übertragen werden und in der es zu keiner Überlappung kommen darf.

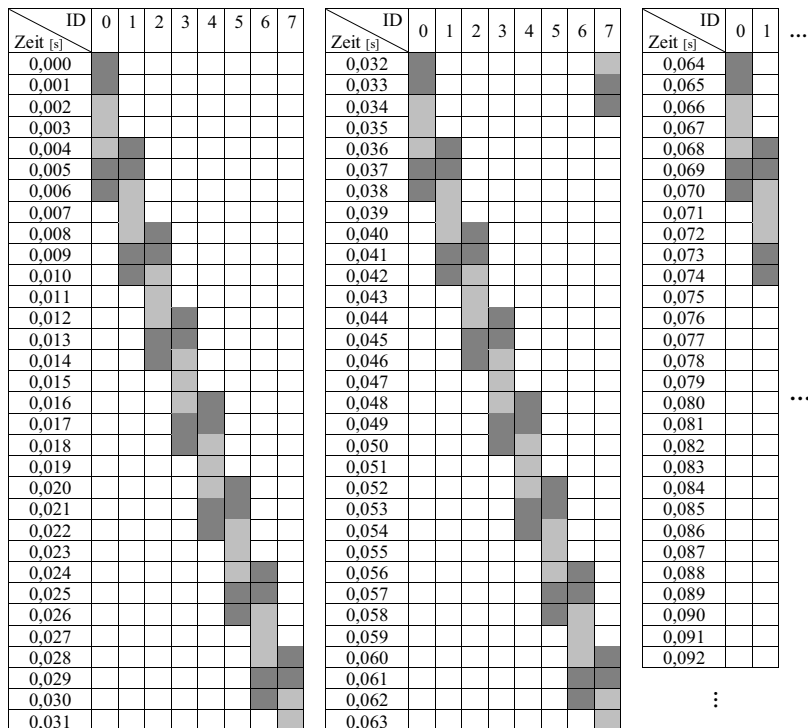
Das gezeigte Ablaufdiagramm zeigt die Zeitslots, in denen die einzelnen Teilnehmer aktiv werden dürfen, um Nachrichten zu versenden. Der Ablauf beginnt mit dem synchronisierenden Triggersignal der GPS-Receiver, woraufhin Teilnehmer 0 mit dem Datenversand beginnt. Nach etwa zwei Millisekunden sind die Daten verarbeitet und an das XBee-Modul übertragen, auf diesem verarbeitet und können versendet werden. Nach etwa sieben Millisekunden liegt die gesendete Nachricht bei allen anderen in Reichweite befindlichen Teilnehmern vor, ist verarbeitet und in der Adjazenzmatrix abgespeichert, sodass der nächste Teilnehmer die empfangenen Nachrichten wiederum ergänzt und mit ggf. vorliegenden Informationen erweitert versenden kann. Auffällig sind bei diesem Prinzip die relativ großen Zeitanteile, in denen keine Nachrichten übertragen werden.



**Bild 5.6:** Zeitlicher Ablauf der Verarbeitungs- (dunkelgrau) u. Übertragungszeiten (mittelgrau) ohne Überlappung der Erkundungsnachrichten



Eine theoretisch denkbare Optimierung der Ausnutzung der Übergangszeit zeigt nachfolgendes Bild 5.7 bei der Teilnehmer 2 das Versenden von Informationen beginnt bevor die Daten von Teilnehmer 1 empfangen wurden.



**Bild 5.7:** Zeitlicher Ablauf der Verarbeitungs- (dunkelgrau) u. Übertragungszeiten (mittelgrau) mit Überlappung der Erkundungsnachrichten

Gegenüber dem in Abschnitt 5.2 erläuterten theoretischen, konkreten Beispiel würde die Netzerkundung dementsprechend mehr Zeit erfordern, da die Information, dass Teilnehmer 2 Nachrichten von Teilnehmer 1 empfangen kann, erst beim nächsten Durchlauf ausgetauscht wird. Bei bestimmten Netztopologien jedoch kann die Netzerkundung durch die höhere zeitliche Nachrichtendichte auch kürzer ausfallen. Eine vertiefende Betrachtung dieses Sachverhalts erfolgt im Abschnitt 5.3 basierend auf Simulationen.

## 5.3 Simulationsbasierte Untersuchung der Netzerkundung

Zur Untersuchung des Einflusses der Netzgröße, der Netztopologie, der Auswirkungen eines Erkundungsprinzips mit oder ohne zeitliche Überlappung und der Robustheit beim zufälligen Verlust einzelner Nachrichten auf die benötigte Zeit zur Netzerkundung wurde das vorgestellte theoretische Netzerkundungsprinzip, das im Grunde auf definierten Zeitslots zum eng getakteten Senden von Nachrichten ohne Nachrichtenkollisionen beruht, als Simulation in MATLAB abgebildet. Im Folgenden wird zunächst der Aufbau der Simulation und anschließend die Simulationsergebnisse vorgestellt.

### 5.3.1 Aufbau der Simulation zur Netzerkundung

Der Kern des Konzepts ist dabei das getaktete, synchronisierte Erkundungsprinzip durch den Austausch der Adjazenzmatrizen. Der Aufbau der Simulation strukturiert sich wie folgt: Im ersten Schritt wird eine zufällige Netztopologie als Basis für die weiteren Untersuchungen nach folgendem Schema generiert:

1. Vorgabe einer Teilnehmerzahl  $n \in \mathbb{N}$  mit  $N = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$
2. Auswahl  $n$  zufälliger Teilnehmer IDs aus  $ID \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$
3. Generierung von zufälligen symmetrischen Adjazenzmatrizen

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass auf Grund der zufälligen Generierung der Netztopologien vollvermaschte Topologien, bei denen alle Teilnehmer direkt miteinander verbunden sind (vgl. Bild 4.3), sowie Topologien mit minimaler Anzahl an Verbindungen (vgl. Bild 4.4) wenig oder gar nicht vorkommen. Zudem nimmt dieser Effekt mit steigender Teilnehmerzahl zu. Die Begründung findet sich in der Art und Weise, wie die zufälligen Netze erzeugt werden, und wird am folgenden Beispiel für eine Teilnehmerzahl 8 erläutert.

Die Adjazenzmatrizen für die vollvermaschte Netztopologie (Bild 5.8) stellt sich als eine symmetrische Matrix dar, bei der alle Einträge mit einer 1 besetzt sind und nur die Hauptdiagonale Nullen enthält.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	1	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1
6	1	1	1	1	1	0	1	1
7	1	1	1	1	1	1	0	1
8	1	1	1	1	1	1	1	0

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0	1	0
7	0	0	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	0	0	0	1	0

**Bild 5.8:** Adjazenzmatrix vollvermaschtes Netz mit acht Teilnehmern (links) und minimal vermaschtes Netz mit acht Teilnehmern (rechts)

Die in MATLAB implementierte zufällige Generierung basiert im Grunde auf zwei ineinander verschachtelten For-Schleifen. Die äußere Schleife durchläuft die Zeilen (Laufvariable  $i$ ) und die innere Schleife die Spalten (Laufvariable  $j$ ) der rechten oberen Halbebene der Matrix (auf Grund der Symmetrie erfolgt eine Spiegelung in die linke untere Halbebene). Für jeden Index wird unter Nutzung der Matlab Funktion `randi` zufällig und gleichverteilt eine 1 oder 0 generiert.

Pseudocode:

```

for i = 1:size((VecNodes),2) %Zeilen für alle Teilnehmer durchlaufen -> Sender
    for j=i+1:size((VecNodes),2) %alle weiteren Zeilen durchlaufen -> Empfänger
        neighbours(VecNodes(i),VecNodes(j)) = randi(2,1)-1; %Zufällig 1 oder 0
                                                generieren ->
                                                Verbindung ja/nein
        neighbours(VecNodes(j),VecNodes(i)) = neighbours(VecNodes(i),VecNodes(j));
                                                %Symmetrischen Eintrag erzeugen
    end
end
end

```

Für den Fall der vollvermaschten Topologie müsste demzufolge 28-mal hintereinander zufällig eine 1 erzeugt werden. Der Fall der minimal vermaschten Topologie hingegen ist nicht auf Grund der aufeinanderfolgenden Häufigkeit der zufälligen Erzeugung einer 1 selten, sondern vielmehr auf Grund der speziellen Abfolge.

Um sowohl die vollvermaschten als auch die minimal vermaschte Topologie in der Simulation zu berücksichtigen, wurde die Simulation um diese beiden Fälle erweitert. Für die Generierung der vollvermaschten Topologien wird für jeden vorhandenen Teilnehmer eine Verbindung generiert, für die minimal vermaschten Topologien jeweils nur eine Verbindung entlang der Hauptdiagonalen (vgl. Bild 5.8).

Die Verteilung der drei Fälle erfolgt nach folgendem festgelegtem Schlüssel:

- Vollvermaschte Topologie: 10 Prozent
- Minimal vermaschte Topologie: 10 Prozent
- Zufällige Topologie: 80 Prozent

Im zweiten Schritt wird basierend auf der so erzeugten zufälligen Netztopologie die eigentliche Netzerkundung simuliert. Hierzu sind die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Schritte mittels verschachtelter Schleifen und Abfragen abgebildet, sodass bei jedem Teilnehmer mit jedem Sende- und Empfangsschritt die Adjazenzmatrix gefüllt wird. Als Abbruchkriterium dient die Überprüfung der Gleichheit aller Adjazenzmatrizen bei allen Teilnehmern. Die benötigte Anzahl an Takten dient als Basis für die anschließende Auswertung.

Für jede generierte Netztopologie werden aus Gründen der Vergleichbarkeit folgende Variationen bei der Netzerkundung bzw. Versuchsart durchgeführt:

Versuch 1: Netzerkundung ohne zeitliche Überlappung

Versuch 2: Netzerkundung ohne zeitliche Überlappung und 1 Prozent Nachrichtenverlust

Versuch 3: Netzerkundung ohne zeitliche Überlappung und 5 Prozent Nachrichtenverlust

Versuch 4: Netzerkundung ohne zeitliche Überlappung und 10 Prozent Nachrichtenverlust

Versuch 5: Netzerkundung mit zeitlicher Überlappung

Versuch 6: Netzerkundung mit zeitlicher Überlappung und 10 Prozent Nachrichtenverlust

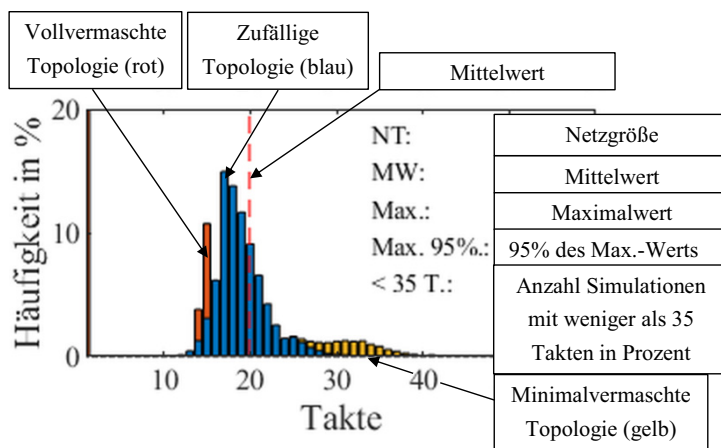
Die Simulation von Nachrichtenverlusten erfolgt über die Matlab Funktion `rand(1,1)`, die eine gleichmäßig verteilte Pseudozufallszahl im Wertebereich zwischen 0 und 1 generiert, und eine zusätzliche Abfrage bei der Simulation der Netzerkundung, die nur Nachrichten auf Empfängerseite berücksichtigt, die oberhalb des dem Nachrichtenverlust (1, 5, 10 Prozent) entsprechendem Schwellwerts liegen.

Die Validierung der Simulation erfolgte durch einen stichprobenhaften händischen Abgleich der Ergebnisse für die beiden Fälle ohne Nachrichtenverlust.

### 5.3.2 Einfluss der Netzgrößen und Netztopologien

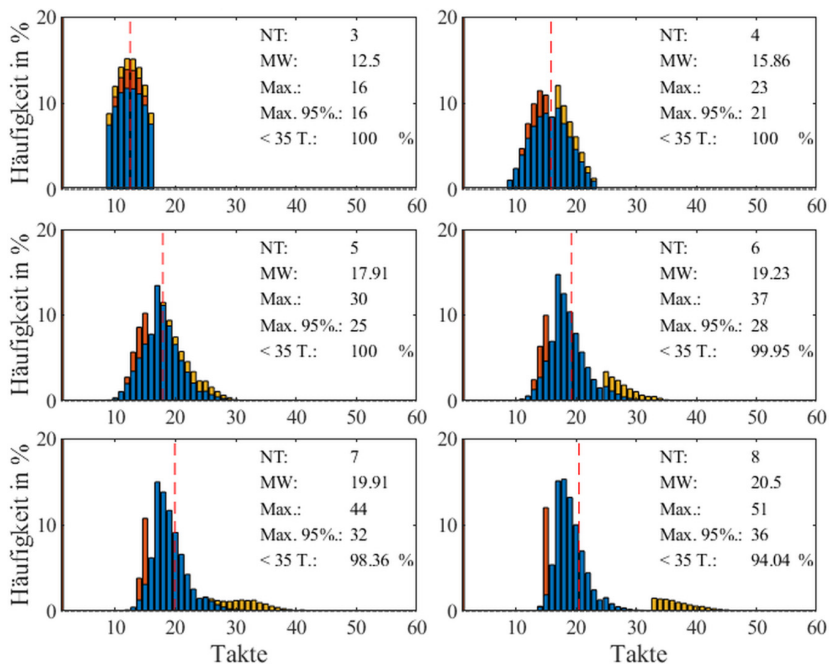
Beispielhaft für alle nachfolgenden Simulationsergebnisse wird an Hand von Bild 5.9, dass das Ergebnis der Simulation für eine **Netzerkundung ohne zeitliche Überlappung** für eine Netzgröße (NT) von sieben Teilnehmern und 100000 simulierte Netztopologien zeigt, die Darstellungsform beschrieben, ohne auf die Werte einzugehen. Zu sehen ist für die Netzgröße die prozentuale Verteilung der Häufigkeit der benötigten Takte zur Netzerkundung aufgetragen über der benötigten Anzahl an Takten. Die unterschiedlichen Farben ordnen die

Daten den drei im vorherigen Abschnitt erläuterten Fällen vollvermaschte (orange), minimal vermaschte (gelb) und zufällige Topologie (blau) zu. Die Unterscheidung dient zur Einordnung des Zusammenhangs zwischen der Art der Topologie und der benötigten Taktzahl zur Erkundung. Zusätzlich sind der Mittelwert (MW) und die maximale (Max) Anzahl benötigter Takte angegeben. Der Wert „Max 95%“ gibt die benötigten Takte für 95 Prozent aller simulierten Netztopologien an und gibt somit im Vergleich zum Maximalwert einen Hinweis darauf, wie viele Netztopologien im oberen Bereich der Verteilung liegen. Basierend auf den ermittelten sieben Millisekunden pro Erkundungsnachricht und einer veranschlagten Zeit von 250 Millisekunden (35 Takte) die für die Netzerkundung zur Verfügung stehen, ist zusätzlich angegeben wieviel Prozent der simulierten Netztopologien unterhalb dieses Werts liegen. Der Mittelwert ist mit einer roten, gestrichelten vertikalen Linie im Diagramm zur Orientierung eingezeichnet.



**Bild 5.9:** Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien für Netzgröße mit 7 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takte (< 35 T.)

Bild 5.10 zeigt das Ergebnis der Simulation für eine **Netzerkundung ohne zeitliche Überlappung**. Simuliert wurden für jede Netzgröße (NT) von drei bis acht Teilnehmern jeweils 100000 Netztopologien.



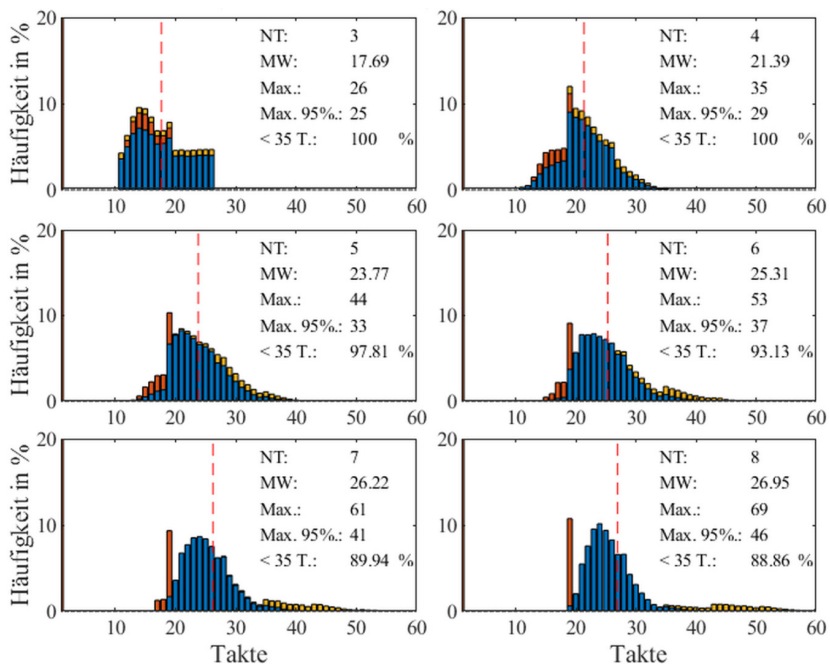
**Bild 5.10:** Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien pro Netzgröße mit 3 bis 8 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

Für eine Netzgröße von drei Teilnehmern (Teilbild oben links) liegt der Mittelwert der benötigten Takte zur Netzerkundung bei 12,5 Takten und im Maximum werden 16 Takte zur Netzerkundung benötigt. In diesem Fall werden zudem 100% aller Topologien in weniger als 35 Takten erkundet. Ebenfalls ist dem Diagramm zu entnehmen, dass die drei Netztypen für die Simulation über den Bereich relativ gleichmäßig verteilt sind. Für eine Abschätzung der Umsetzbarkeit ist an dieser Stelle der Fall mit der maximalen Anzahl an Teilnehmern am relevantesten. Für diesen liegt der Mittelwert für die benötigten Erkundungstakte bei gerundet 21 Takten und der maximale Wert bei 51 Takten. Unter Zugrundelegung der ermittelten Übertragungszeit von sieben Millisekunden pro Takt ergeben sich daraus eine mittlere Erkundungszeit von ca. 140 Millisekunden und eine maximale Erkundungszeit von 357 Millisekunden. Innerhalb von 35 Takten werden zudem rund 94 Prozent der simulierten Topologien erkundet, bei einem Takt mehr steigt der Wert auf 95% an.

Der große Unterschied zwischen der maximalen Anzahl an benötigten Takten von 51 und dem Maximalwert für die unteren 95 Prozent der simulierten Netztopologien von 36 Takten spiegelt zudem die geringe Häufigkeit an hohen benötigten Taktzahlen wieder, wie es auch aus dem Diagramm abgelesen werden kann. Deutlich ist zudem zu erkennen, dass die vorgesehene Taktzahl für die Netzerkundung von 35 Takten nur bei Topologien mit minimaler Vermaschung (Linientopologien) überschritten wird (gelb markiert).

Das Simulationsergebnis für die Variation der Netzerkundung basierend auf dem Erkundungsprinzip mit einer **zeitlichen Überlappung** (vgl. Bild 5.7) zeigt in gleicher Darstellungsform Bild 5.11. Der Auswertung ist zu entnehmen, dass dieser Ansatz – trotz einer besseren Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Zeiten zur Datenübertragung – für alle Netztopologien in allen Bereichen (Mittelwert, Maximalwert, 95% vom Maximalwert und Anteil erkundeter Netze in unter 35 Takten) und über alle Netzgrößen signifikant schlechtere Ergebnisse zeigt.

Obwohl hier theoretisch das Übertragungsmedium besser ausgenutzt wird, ergibt die Simulation durchweg über alle Netzgrößen sowohl einen höheren Wert für die mittleren benötigten Erkundungstakte als auch für die maximale Anzahl an Takten. Für den Fall mit der maximalen Anzahl an Teilnehmern liegt die Erkundungszeit – wieder unter der Annahme von sieben Millisekunden pro Takt – im Mittel bei 189 Millisekunden (27 Takten) und im Maximum bei 483 Millisekunden (69 Takte). Im Vergleich zum Ansatz ohne verschachtelte Sendezeitpunkte beim Maximalwert somit um 133 Millisekunden höher. Prozentual entspricht dies einem Anstieg von rund 37 Prozent. Erklären lässt sich dies dadurch, dass Informationen infolge der Verschachtelung erst im nächsten Durchlauf weitergegeben werden können. Dies führt auch dazu, dass der Streuungsbereich für die benötigte Anzahl an Takten deutlich ansteigt.

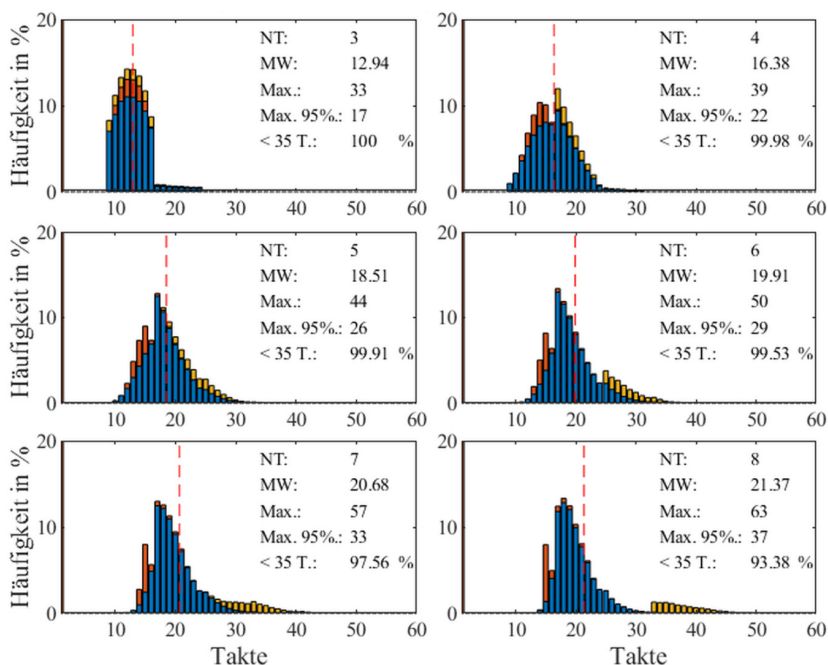


**Bild 5.11:** Verschachtelte Sendezeitpunkte, Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien pro Netzgröße mit 3 bis 8 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

### 5.3.3 Einfluss von Nachrichtenverlusten

Die folgenden Abbildungen Bild 5.12 bis Bild 5.15 zeigen die Simulationsergebnisse für die gleichen zu Grunde liegenden Netztopologien unter Einfluss zufälliger Nachrichtenverluste auf Empfangsseite. Bild 5.12 zeigt die Ergebnisse für eine **Fehlerquote von einem Prozent** für eine unverschachtelte Netzerkundung. Im Vergleich zur simulativen Untersuchung der benötigten Erkundungstakte der gleichen Netztopologien ohne Nachrichtenverluste lässt sich ein deutlicher Anstieg bei der maximal benötigten Taktzahl vor allem bei kleinen Netzgrößen feststellen.

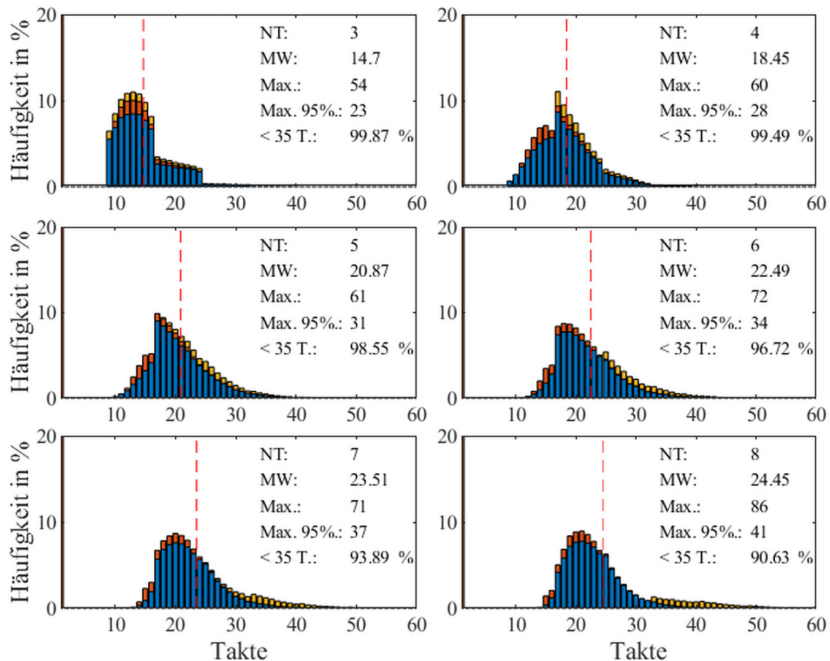




**Bild 5.12:** Fehlerquote von einem Prozent auf Empfangsseite, Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien pro Netzgröße mit 3 bis 8 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

Allerdings steigt der maximale Wert für den Fall mit acht Teilnehmern nur bedingt von 51 auf 63 an (entsprechend bei sieben Millisekunden Taktzeit von 357 auf 441 Millisekunden) und die mittlere benötigte Taktzahl von 20,5 Takten auf 21,4 Takte, was einer mittleren Erkundungszeit von ca. 150 Millisekunden entspricht. Insgesamt können fast 95 Prozent der simulierten Netztopologien in unter 35 Takten erkundet werden. Gegenüber dem Simulationsergebnis ohne Nachrichtenverluste verändert sich der Wert nur geringfügig von rund 94 Prozent auf 93,4 Prozent für die Netzgröße mit acht Teilnehmern. Für alle kleineren Netzgrößen können 95 Prozent der simulierten Netze innerhalb von 35 Takten erkundet werden. In den Diagrammen ist wieder deutlich zu erkennen, dass die hohen benötigten Taktzahlen bei den Linientopologien vorkommen.

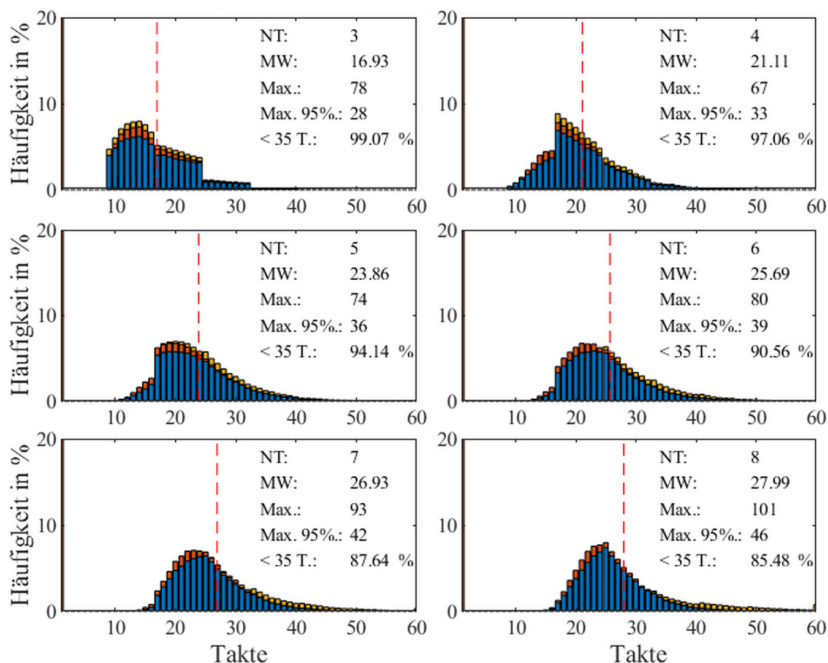
Das Ergebnis einer weiteren Erhöhung der **Fehlerquote auf fünf Prozent** ist in Bild 5.13 dargestellt.



**Bild 5.13:** Fehlerquote von fünf Prozent auf Empfangsseite, Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien pro Netzgröße mit 3 bis 8 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

Auch hier ist erneut ein deutlicher Anstieg der maximal benötigten Taktzahl feststellbar, wohingegen der Mittelwert nur bedingt ansteigt. Ebenso ist ein deutlicherer Anstieg bei den Netztopologien mit weniger Teilnehmern zu erkennen. Dieser lässt sich dadurch begründen, dass das Verhältnis von Takten in denen ein Datenempfang bzw. -versand erfolgt zu den ungenutzten Takten ungünstiger ist bzw. weniger Teilnehmer existieren, über die die Informationen auf alternativen Wegen verteilt werden können.

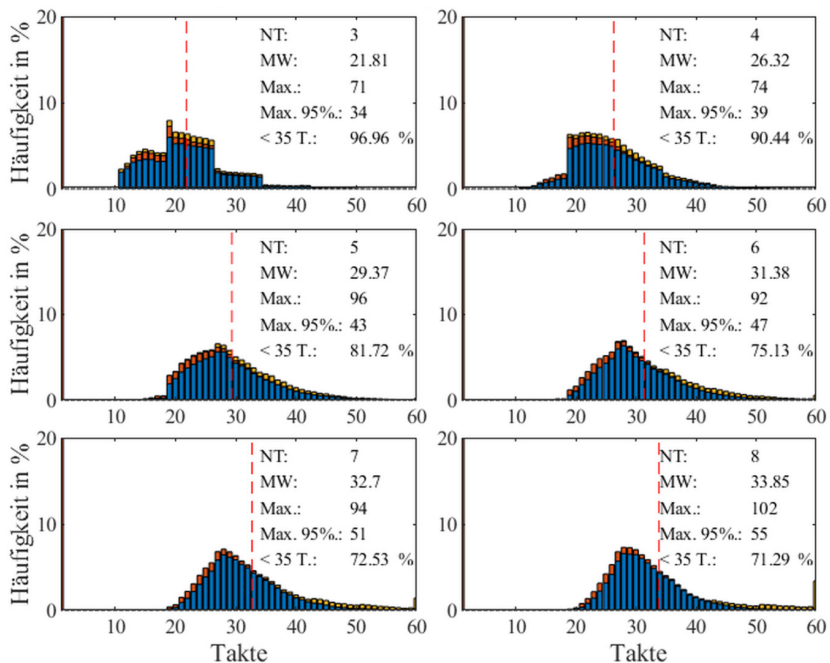
Den ungünstigsten Betrachtungsfall zeigt Bild 5.14 mit einer **Fehlerquote von zehn Prozent**, also einem Verlust jeder zehnten Nachricht auf Empfangsseite.



**Bild 5.14:** Fehlerquote von zehn Prozent auf Empfangsseite, Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien pro Netzgröße mit 3 bis 8 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

Feststellbar ist ein im Vergleich zur Basisuntersuchung ohne Fehler und ohne Verschachtelung deutlicher Anstieg bei der max. benötigten Taktzahl, wobei die Unterschiede zwischen den von der Teilnehmerzahl abhängigen absoluten Werten geringer ausfallen. Der maximale Wert für die benötigten Takte zur Netzerkundung steigt auf 101 Takte an und ist somit fast doppelt so hoch wie für den Fall ohne Fehler. Der Mittelwert hingegen steigt wesentlich weniger auf knapp 28 Takte an. Innerhalb von 35 Takten können in diesem Fall noch rund 86 % der Netztopologien erkundet werden.

Bild 5.15 zeigt abschließend das Ergebnis der Simulation des Ansatzes der **verschachtelten Netzerkundung in Kombination mit einer Fehlerquote von zehn Prozent**. Ebenso wie für den Fall ohne Fehler zeigt die Auswertung, dass der Ansatz in allen Bereichen und für alle Netzgrößen im direkten Vergleich zum Ansatz ohne Verschachtelung eine höhere Anzahl an Takten benötigt und somit keine Vorteile, auch nicht in Bezug auf die Robustheit, aufweist.



**Bild 5.15:** Verschachtelte Sendezeitpunkte und Fehlerquote von 10 Prozent, Simulationsergebnisse 100000 zufällig generierter Netztopologien pro Netzgröße mit 3 bis 8 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Ansatz ohne verschachtelte Sendezeitpunkte für die Netzerkundung geeignet ist und selbst bei einem Verlust jeder zehnten Nachricht noch rund 85 Prozent aller Topologien in den vorgesehenen 35 Takten erkundet werden können und somit in der veranschlagten Zeit von 250 Millisekunden. Für den Fall ohne Störungen und somit keinem Verlust an Nachrichten steigt dieser Wert auf rund 95 Prozent an. Für diesen Fall lässt sich der Auswertung zudem entnehmen, dass die hohen Taktzahlen nur bei strengen Linientopologien auftreten.

## 5.4 Simulationsbasierte Untersuchung des Nutzdatenaustauschs

Im folgenden Abschnitt wird zunächst kurz auf den Aufbau der Simulation für den Nutzdatenaustausch eingegangen, bevor im Anschluss die Ergebnisse für den Einfluss der Netztopologie und die Datenmenge vorgestellt werden.

### 5.4.1 Aufbau der Simulation zum Nutzdatenaustausch

Zum Zweck der Abschätzung der benötigten Zeit zum Austausch der Nutzdaten und zur Überprüfung der Anforderung einer Updaterate von einem Hertz, die maßgeblich von den benötigten Zeiten zur Netzerkundung und zum Datenaustausch abhängig ist, wurde die für die Netzerkundung genutzte Simulation um die Simulation des Nutzdatenaustauschs erweitert. Da der eigentliche Nutzdatenaustausch nicht im Fokus dieser Arbeit steht, wird darüber hinaus auf eine umfangreichere theoretische Betrachtung verzichtet und auf die im Kapitel 2.3.4 aufgeführten Grundlagen verwiesen.

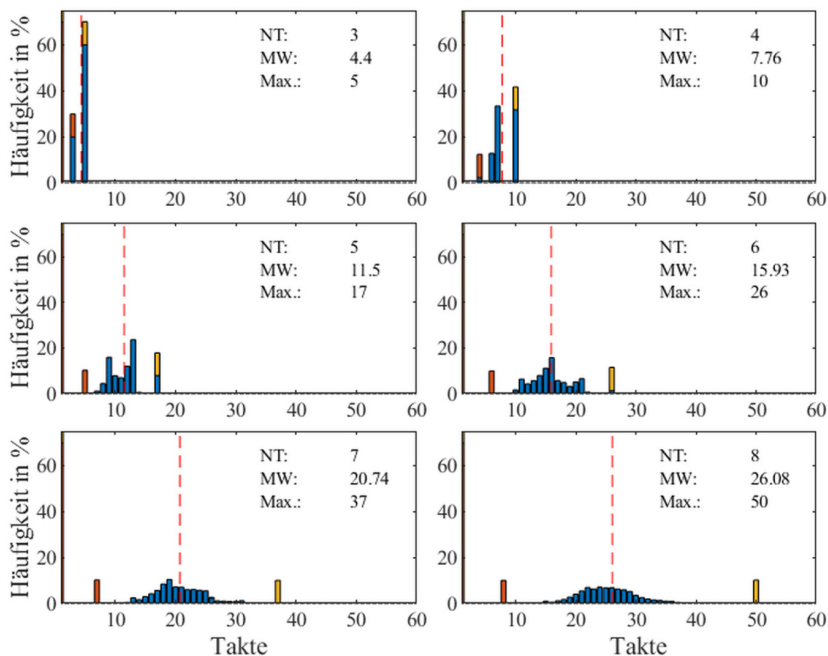
Aufbauend auf den zufällig erzeugten Netztopologien der Simulation der Netzerkundung wurde ein aus der Literatur abgeleiteter, einfach gehaltener Routingalgorithmus zum Austausch aller Nutzdaten implementiert, der im Wesentlichen nach folgendem Schema abläuft:

1. Suche alle Teilnehmer als mögliche *Sender*, die Rohdaten besitzen, die
  - a. mindestens ein anderer *Empfänger* nicht besitzt und
  - b. die nicht bei allen direkten Nachbarn vorliegen
2. Suche *Sender* mit den meisten Nachbarn bzw. *Empfängern*
3. Wenn der *erste Sender* gefunden ist, überprüfe, ob es weitere *Sender* gibt, die keinen gemeinsamen Nachbarn mit dem *ersten Sender* besitzen (Optional: paralleler Datenaustausch) und wähle diese als *weitere Sender* aus
  - a. Wiederhole Schritt 3 bis keine weiteren *Sender* mehr gefunden werden
4. Virtueller Datenaustausch (alle Empfänger erhalten Rohdaten der entsprechenden Sender)
5. Hat jeder Teilnehmer alle Rohdaten empfangen?
  - a. Ja: Beende Datenaustausch
  - b. Nein: Fortsetzung mit Schritt 1

Mit jedem virtuellen Datenaustausch wird ein Rohdatenpaket ausgetauscht, sodass jedes Durchlaufen des 4. Schritts als Austauschtakt gezählt wird. Die Umrechnung der benötigten Austauschakte in die benötigte Austauschzeit erfolgt im Anschluss über die experimentell ermittelte notwendige Übertragungszeit für ein Rohdatenpaket.

### 5.4.2 Einfluss der Netztopologie auf den Datenaustausch

Für die Simulation des Datenaustauschs spielt es im Gegensatz zur Netzerkundung keine Rolle, welche Teilnehmer Teil der Topologie sind, sondern lediglich welche Teilnehmer mit welchen Teilnehmern benachbart sind. Somit gibt es beispielsweise für den Fall von drei Teilnehmern genau zwei Fälle, eine Linientopologie und eine Topologie in der alle Teilnehmer verbunden sind. Bild 5.16 zeigt die Ergebnisse für die Anzahl benötigter Takte für den simulierten Datenaustausch.



**Bild 5.16:** Simulationsergebnis für den Datenaustausch für Netzgrößen mit drei bis acht Teilnehmern (NT), Mittelwert (MW) und Maximalwert (Max)

Da die Nutzung der zufällig generierten Topologien nicht notwendig, aber auch nicht falsch ist, kann die gemeinsame Basis genutzt werden, um eine Auswertung der benötigten Gesamtzeit zur Netzerkundung und dem anschließenden Datenaustausch vorzunehmen. Auch hier ist wie bei der Netzerkundung für jede Netzgröße die Häufigkeit in Prozent aufgetragen mit der eine bestimmte Anzahl an Takten benötigt wird. Die Farben markieren erneut den Typ der Netztopologie. Für den eben angeführten einfachen Fall einer Netztopologie mit drei Teilnehmern gibt es genau zwei mögliche Ergebnisse. Stehen alle Teilnehmer miteinander im

direkten Kontakt muss jeder Teilnehmer einmal seine Rohdaten verschicken. Demzufolge werden drei Takte zum Datenaustausch benötigt. Für den Fall, dass die drei Teilnehmer in einer Reihe angeordnet sind, müssen die beiden Teilnehmer an den äußeren Enden der Reihe jeweils einmal ihre Daten senden (2 Takte). Im Anschluss muss der mittlere Teilnehmer sowohl die eigenen wie auch die Rohdaten der beiden äußeren Teilnehmer (3 Takte) senden, um einen vollständigen Austausch in insgesamt fünf Takten zu erreichen. Für den Fall von acht Teilnehmern werden entsprechend im Minimum acht Takte und im Maximum 50 Takte benötigt.

Dieses lässt sich mittels folgender Formeln entsprechend abbilden, wobei ein Takt einer Nachrichtensendung entspricht. Die minimale Anzahl an Nachrichtensendungen entspricht der Teilnehmerzahl.

$$\text{Nachrichtensendung}_{\text{Min}} = \text{Teilnehmerzahl} \quad (5.5)$$

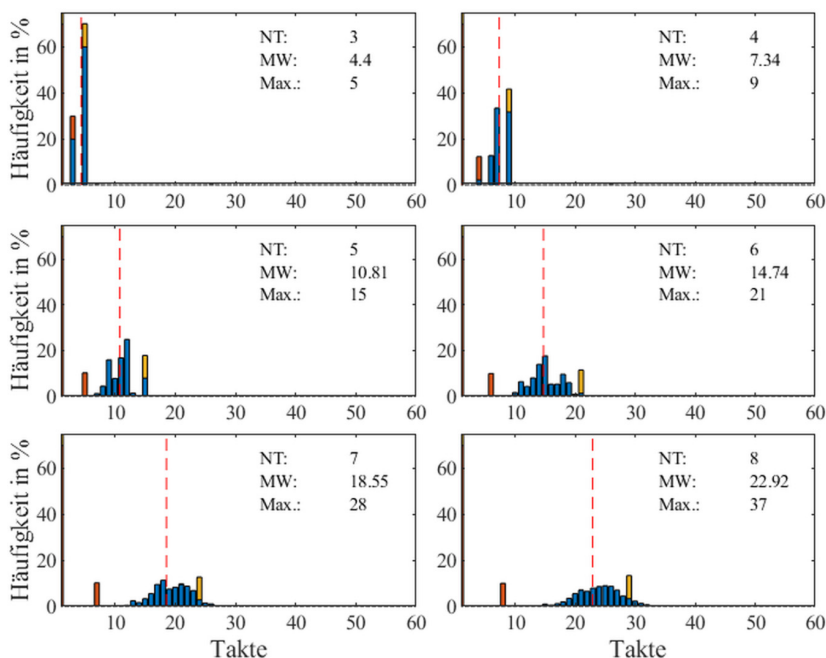
Die maximale Anzahl an Nachrichtensendungen lässt sich wie folgt herleiten. Jeder äußere Teilnehmer muss genau einmal seine eigenen Daten versenden, somit ergeben sich zwei Nachrichtensendungen. Alle anderen Teilnehmer ( $\text{Teilnehmerzahl} - 2$ ) müssen ihre eigenen Daten und die Daten aller anderen Teilnehmer einmal verschicken, also insgesamt so häufig wie es Teilnehmer gibt. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$\text{Nachrichtensendung}_{\text{Max}} = 2 + (\text{Teilnehmerzahl} - 2) \cdot \text{Teilnehmerzahl} \quad (5.6)$$

Diese lässt sich mit Hilfe der zweiten binomischen Formel zu folgender Formel (5.7) zusammenfassen:

$$\text{Nachrichtensendung}_{\text{Max}} = (\text{Teilnehmerzahl} - 1)^2 + 1 \quad (5.7)$$

Bild 5.17 zeigt die Ergebnisse für den simulierten Datenaustausch, die sich ergeben, wenn auch **parallele Datenübertragungen** zugelassen werden. Parallele Datenübertragungen sind dann möglich, wenn Teilnehmer keinen gemeinsamen Nachbarn besitzen und es daher zu keiner Störung bei der Übertragung kommen kann. Die Anzahl der benötigten Takte reduziert sich dadurch für den maximalen Fall für den hinterlegten Algorithmus für den Datenaustausch bei acht Teilnehmern von 50 Takten auf 37 Takte und die mittlere benötigte Taktzahl von rund 26 auf rund 23 Takte.



**Bild 5.17:** Simulationsergebnis für den Datenaustausch für Netzgrößen mit drei bis acht Teilnehmern (NT) und paralleler Datenübertragung, Mittelwert (MW) und Maximalwert (Max)

### 5.4.3 Einfluss des Datenvolumens

Das Datenvolumen hat einen wesentlichen Einfluss auf die benötigte Übertragungszeit und hängt zum einen von den Rohdaten (Kapitel 4.1, Tabelle 4.1) und zum anderen von der Anzahl der von den Teilnehmern „sichtbaren“ Satelliten ab. Werden ausschließlich Satelliten des GPS-Systems genutzt, liegt diese in der Regel im Bereich bis maximal zwölf Satelliten, wobei für eine gute Positionierung lediglich Satelliten mit einem geringen Rauschverhältnis sinnvoll nutzbar sind.

Da sich die benötigte Übertragungszeit aus einer Vielzahl von Faktoren ergibt und aus mehreren zeitlichen Komponenten zusammensetzt (vgl. Abschnitt „Definition der Nutzdaten und der daraus resultierenden Anforderungen“ S.57 f.), wurde die benötigte Übertragungszeit für verschiedene Rohdatenmengen experimentell ermittelt. Die Rohdatenmengen ergeben sich aus dem Produkt aus Satellitenanzahl und den Bytes eines Rohdatenpakets. Tabelle 5.4 zeigt

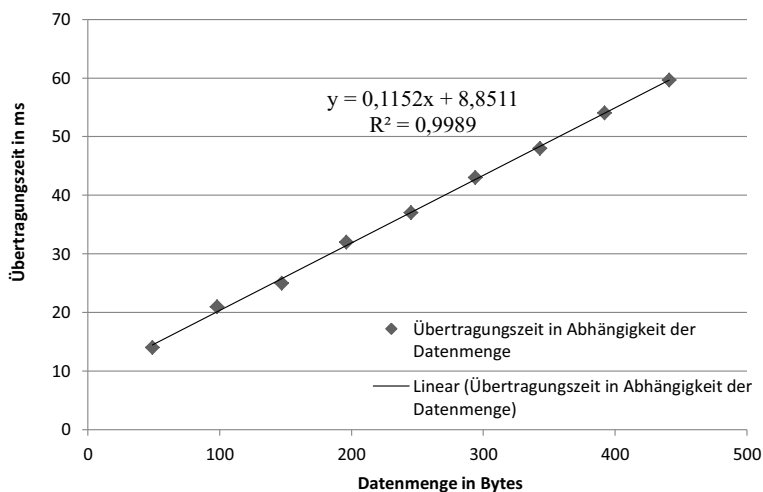


die aufbereiteten Ergebnisse der Messung. In der ersten Spalte ist der Sendezeitpunkt und in der zweiten Spalte der Empfangszeitpunkt aufgeführt. Auf Grund des Gesamtablaufs bei der Messung erfolgt der Datenversand 755 Millisekunden nach Beginn eines Taktes, woraus sich ein Offset von 755 Millisekunden ergibt. Die nachfolgenden Spalten listen die Nutzdatenmenge (Produkt aus Satellitenanzahl und Rohdatenmenge pro Satellit), die Übertragungszeit (Differenz aus Sende- und Empfangszeitpunkt), die Satellitenanzahl und die Paketanzahl auf. Letztere ergibt sich daraus, dass auf Grund des Protokolls pro Datenpaket max. 100 Nutzdatenbyte übertragen werden können.

**Tabelle 5.4:** Messergebnisse Übertragungszeiten im Laborversuch für Rohdaten

Sendezeitpunkt [ms]	Empfangszeitpunkt [ms]	Nutzdatenmenge [Bytes]	Übertragungszeit [ms]	Satellitenanzahl	Paketanzahl
755	769	49	14	1	1
755	776	98	21	2	1
755	780	147	25	3	2
755	787	196	32	4	2
755	792	245	37	5	3
755	798	294	43	6	3
755	803	343	48	7	4
755	809	392	54	8	4
755	815	441	60	9	5

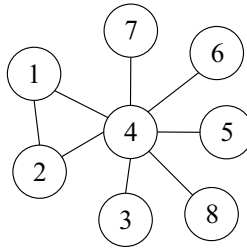
Bild 5.18 zeigt die Auswertung der in Tabelle 5.4 aufgeführten Messergebnisse. Aufgetragen ist die ermittelte Übertragungszeit in Millisekunden auf der Ordinate über der auf der Abszisse aufgetragenen Datenmenge in Bytes. Wie zu vermuten liegt ein nahezu linearer Zusammenhang vor, dessen Abweichungen durch die Zerlegung in Datenpakete mit je 100 Datenbytes zu erklären sind (Unterschied Nutzdaten zu Gesamtdaten).



**Bild 5.18:** Messergebnisse der Übertragungszeiten im Laborversuch für den Rohdatenaustausch mit Ausgleichsfunktion für den Zusammenhang zwischen Übertragungszeit in Millisekunden und Datenmenge in Byte

Unter Berücksichtigung der ermittelten Werte ergibt sich somit eine max. benötigte Übertragungszeit bei paralleler Datenübertragung für den aus Anforderungssicht an den Datenaustausch ungünstigen Fall (Teilnehmerzahl 8, Linientopologie, Satellitenanzahl 9) von rund 2,2 Sekunden, die zweifelsohne nicht innerhalb einer Taktzeit von 1 Hertz realisiert werden kann. Selbst eine Reduzierung auf sechs auszutauschende Rohdatensätze führt mit 1,6 Sekunden zu einer deutlichen Überschreitung der vorgesehenen Zeit. Eine Betrachtung des Mittelwerts von rund 24 benötigten Takten wiederum verringert, bei ebenfalls sechs Satelliten, die benötigte Zeit zum Datenaustausch auf einen Wert von knapp einer Sekunde. Erst eine zusätzliche Reduzierung der Teilnehmerzahl auf sechs Teilnehmer führt zu einer benötigten Datenübertragungszeit von akzeptablen 645 Millisekunden. In günstigen Topologien in denen z. B. ein Teilnehmer in Verbindung mit vielen anderen steht (Bild 5.19), z. B. in einem urbanen Szenario in dem ein UAV über den Gebäuden fliegt und Kontakt zu den UGV und UAV zwischen den Gebäuden besitzt, ist aber auch der Datenaustausch mit acht Teilnehmern innerhalb der Zeit realisierbar. In diesem Fall sind lediglich 15 Datenübertragungen erforderlich (jeder Teilnehmer einmal die eigenen Rohdaten (8) und Teilnehmer 4 noch einmal die Rohdaten aller anderen Teilnehmer (7)). Entsprechend sind rund

645 Millisekunden bei sechs auszutauschenden Satellitenrohdaten erforderlich, um alle Rohdaten auszutauschen.



**Bild 5.19:** Beispieltopologie zentraler Teilnehmer bei einer Netzwerkgröße von acht Teilnehmern

Da die benötigte Zeit zur Datenübertragung maßgeblich von der Datenmenge abhängig ist, liegt es auf der Hand, eine verlustfreie **Datenkompression** in Betracht zu ziehen. Daher wurde im Rahmen der Untersuchungen ermittelt, inwiefern sich die Datenmenge mit Hilfe der freien Bibliothek `zlib` [zlib17], die auf dem von Jacob Ziv und Abraham Lempel 1977 vorgestellten Verfahren LZ77 [ZiLe77] basiert, reduzieren lässt. In diesem speziellen Fall führt die Verwendung dieses Komprimierungsalgorithmus auf Grund der relativ geringen Datenmenge allerdings nicht zwingend zu einer Reduzierung der Datenmenge. Die Begründung hierfür liegt in der grundsätzlichen Funktionsweise von Komprimierungsalgorithmen, die allgemein beschrieben darauf basiert, wiederkehrende Bitfolgen, Zeichenfolgen oder Folgen von Wörtern durch kürzere Ausdrücke zu substituieren. Gute Komprimierungsraten werden demzufolge erreicht, wenn der Dateninput sehr homogen aufgebaut ist (z. B. bei Bildern große Flächen mit gleicher Farbe) und zudem die Datenmenge so groß ist, dass Wiederholungen von Abfolgen vorkommen. Zudem entsteht durch den Kompressionsalgorithmus ein Datenoverhead zur Abspeicherung der Komprimierungsinformationen. Beim evaluierten Algorithmus wird dieser Overhead mit fünf Byte pro 16 kByte Datenblock und zusätzlichen sechs Byte pro Datenpaket, also mindestens elf Byte angegeben. Im ungünstigsten Fall wächst ein Datenpaket also um elf Byte an, anstatt im Umfang reduziert zu werden. Stichprobenartige Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Reduzierung der Datenmenge nur bei Datenmengen oberhalb von ungefähr 400 Byte realisiert werden kann und die Reduzierung deutlich geringer ist als das Einsparpotential, das durch eine Beschränkung des Austauschs auf die „guten“ Rohdaten erzielt werden kann.

## 5.5 Diskussion der simulationsbasierten Untersuchung

Die simulationsbasierten Untersuchungen zeigen deutlich, dass der Ansatz der verschachtelten oder überlappenden Netzerkundung nicht vorteilhaft und sogar nachteilig gegenüber dem nicht verschachtelten Ansatz ist. Somit wird dieser im Folgenden weiter betrachtet. Dieser Ansatz der taktbasierten Netzerkundung zeigt zudem eine nur moderat ansteigende benötigte Taktanzahl für eine erfolgreiche Netzerkundung bei einem Anstieg der Fehlerquote bei Betrachtung des Mittelwerts. Dies zeigt auch Tabelle 5.5, die die Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchung für die Fälle ohne verschachtelte Netzerkundung unter Berücksichtigung der ermittelten sieben Millisekunden pro Nachricht Übertragungszeit für den Fall von acht Teilnehmern zusammenfasst:

**Tabelle 5.5:** Übersicht Simulationsergebnisse Netzerkundung

Versuch	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Fehlerquote [%]	0	1	5	10
Mittelwert [ms]	143	150	171	196
Maximalwert [ms]	357	441	602	707
Maximalwert 95% [ms]	252	259	287	322
< 35 Takte [%]	94,04	93,38	90,63	85,48

Der Mittelwert der benötigten Erkundungszeit steigt bei einer Fehlerquote von einem Prozent von 143 Millisekunden ohne Fehler nur minimal auf 150 Millisekunden an. Bei zehn Prozent Fehlerquote liegt er bei 196 Millisekunden. Der Maximalwert steigt von 357 Millisekunden deutlich auf rund 700 Millisekunden auf fast das Doppelte an. Eine Betrachtung des Maximalwerts in dem 95 Prozent aller Netztopologien erkundet werden können, ergibt Werte im Bereich von 252 Millisekunden bis 322 Millisekunden bei 10 Prozent Fehlerquote. Die Betrachtung des „< 35 Takte“ Wertes zeigt, dass selbst im ungünstigsten Fall noch rund 85 Prozent aller Netztopologien vollständig erkundet werden.

Tabelle 5.6 zeigt die Ergebnisse für den Rohdatenaustausch mit parallelen Datensendungen. Für die Umrechnung von Datenpaketen in eine Übertragungszeit sind die Rohdaten von sechs Satelliten zu Grunde gelegt, sodass sich pro Datensendung 43 Millisekunden Übertragungszeit ergeben. Ausgehend von den 245 Millisekunden, die ermittelt wurden, um rund 94 Prozent der simulierten Netztopologien zu erkunden, verbleiben für den eigentlichen Datenaustausch ideal betrachtet ca. 750 Millisekunden.

In nachstehender Tabelle sind für drei bis acht Teilnehmer der Mittelwert und der Maximalwert für den Datenaustausch aufgeführt. Die Zahlenwerte sind jeweils das Produkt der benötigten Datenpakete mit der ermittelten Übertragungszeit von 43 Millisekunden.

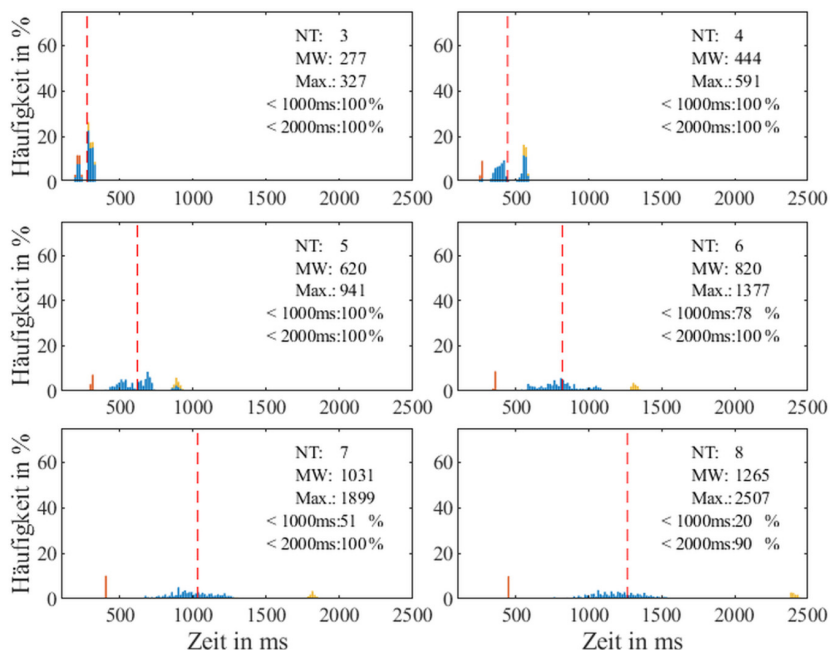
**Tabelle 5.6:** Übersicht Simulationsergebnisse Rohdatenaustausch bei sechs Satelliten

<b>Teilnehmer</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Mittelwert [ms]</b>	190	334	495	685	892	1121
<b>Maximalwert [ms]</b>	215	430	731	1118	1591	1720

Bei einer Betrachtung des Maximalwerts ist ein vollständiger Austausch der Rohdaten innerhalb der genannten 750 Millisekunden nur für Netzgrößen mit bis zu fünf Teilnehmern sichergestellt. Für den Fall von sechs Teilnehmern liegt der Mittelwert noch innerhalb des zeitlichen Rahmens, der obere Bereich der Maximalwerte allerdings außerhalb des Bereichs.

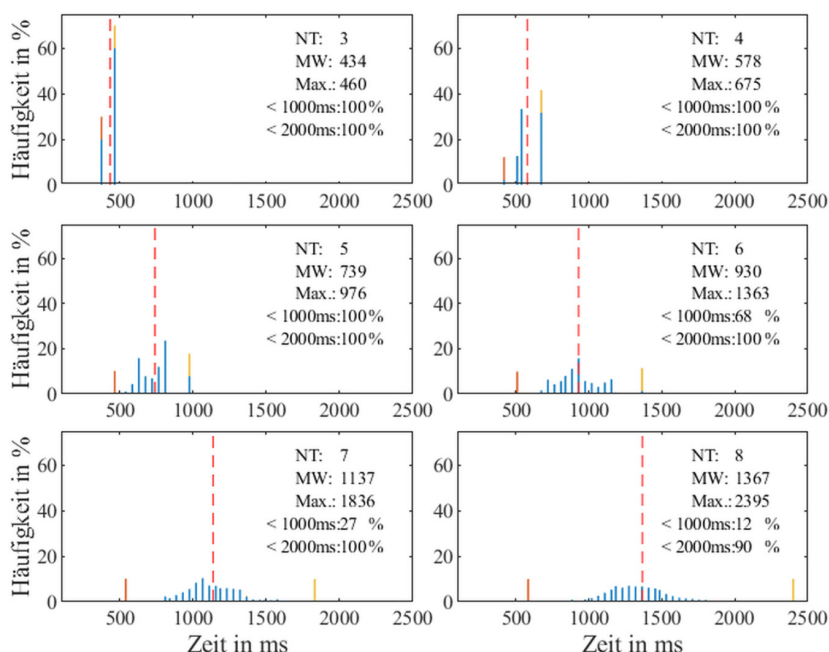
Eine rechnerische Betrachtung der Gesamtzeit für die Netzerkundung und den anschließenden Datenaustausch (Netzerkundung ohne Fehler, Datenaustausch für Rohdaten von sechs Satelliten) liefert das in Bild 5.20 dargestellte Ergebnis.

Für die Netzwerkgrößen mit drei, vier und fünf Teilnehmern können eine Netzerkundung und ein anschließender Datenaustausch innerhalb der gewünschten Wiederholrate von 1 Hertz erfolgen. Für eine Netzwerkgröße von sechs Teilnehmern liegt der Mittelwert noch innerhalb einer Sekunde und insgesamt 78 Prozent aller simulierten Topologien. Der Maximalwert allerdings schon bei knapp 1,4 Sekunden. Eine Netzerkundung mit anschließendem Datenaustausch innerhalb einer Sekunde kann für eine Netzwerkgröße von sieben Teilnehmern im Mittel noch knapp durchgeführt werden. Der Maximalwert ist allerdings mit knapp 1,9 Sekunden deutlich außerhalb des gewünschten Bereichs und es liegen nur 51 Prozent der Ergebnisse im Bereich einer Sekunde. Für den Fall von acht Teilnehmern überschreitet schon der Mittelwert mit 1265 Millisekunden den Grenzwert. Der Maximalwert liegt mit rund 2,5 Sekunden deutlich außerhalb des Bereichs. Nur 20 Prozent der Ergebnisse liegen innerhalb einer Sekunde. Deutlich ist hier wiederum zu erkennen, dass die kritischen Fälle auf den Linientopologien beruhen.



**Bild 5.20:** Simulationsergebnisse für benötigte Gesamtzeit für Netzerkundung (7 ms/Takt) und Datenaustausch von sechs Satellitenrohdaten pro Teilnehmer (43 ms/Datenpaket) für Netzgrößen mit drei bis acht Teilnehmern

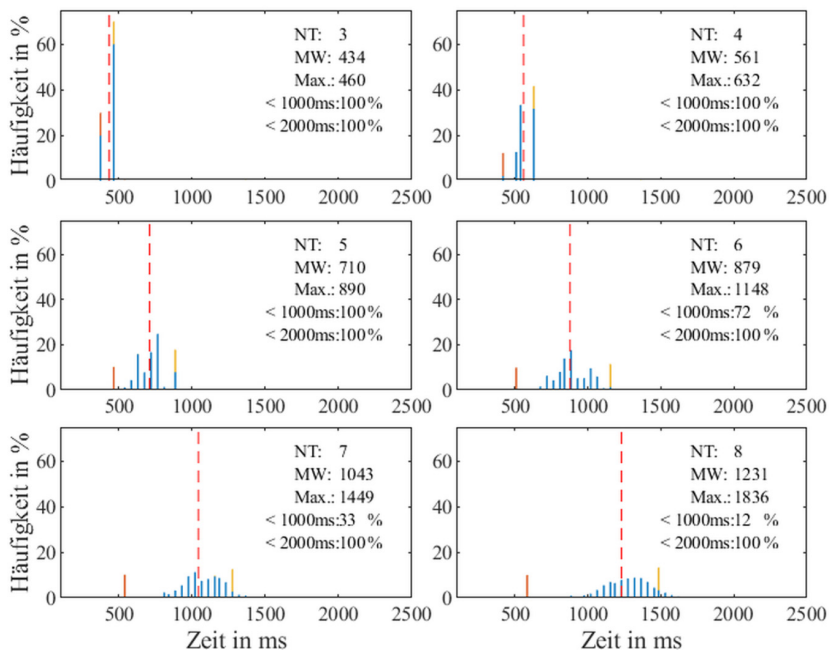
Bild 5.21 zeigt die Ergebnisse bei Berücksichtigung von 245 Millisekunden für die Netzerkundung und der für jede Netztopologie individuell ermittelten Zeit für den Datenaustausch. Die Ergebnisse liegen somit i. d. R. über den zuvor ermittelten Werten, da die simulierte benötigte Taktzahl für die Netzerkundung in 95 Prozent aller Fälle unter 35 Takten liegt. Für die Netzgrößen mit drei, vier und fünf Teilnehmern ist der ermittelte Maximalwert innerhalb des gesetzten Zeitfensters von einer Sekunde, jedoch auf Grund des dargestellten Sachverhalts höher als im Vergleich zur Auswertung in Bild 5.20. Für die restlichen Netzgrößen liegt der Wert unterhalb der zuvor dargestellten Maximalwerte, da in diesen Fällen die Netzerkundung schon mehr Takte bzw. Zeit in Anspruch nimmt. Auch hier lässt sich erneut festhalten, dass die Linientopologien in Bezug auf die benötigte Zeit kritisch sind.



**Bild 5.21:** Simulationsergebnisse mit maximaler Zeit für Netzerkundung von 245 Millisekunden und Datenaustausch von sechs Satellitenrohdaten pro Teilnehmer (43 ms/Datenpaket) für Netzgrößen mit drei bis acht Teilnehmern

Abschließend für die simulative Betrachtung zeigt Bild 5.22 die Ergebnisse bei Berücksichtigung von parallelen Datenübertragungen in Kombination mit einer zu Grunde gelegten Zeit für die Netzerkundung von 245 Millisekunden. Die Ergebnisse liegen ab einer

Netzgröße von sechs Teilnehmern weiterhin oberhalb der ursprünglich gewünschten einen Sekunde. Deutlich zu erkennen ist zudem erneut, dass die zehn Prozent Netztypen der Linientopologie am oberen Ende des Bereichs liegen. Für Netzgrößen bis acht Teilnehmern wiederum liegen alle Ergebnisse unterhalb von zwei Sekunden.



**Bild 5.22:** Simulationsergebnisse mit maximaler Zeit für Netzerkundung von 245 Millisekunden und Datenaustausch von sechs Satellitenrohdaten pro Teilnehmer (43 ms/Datenpaket) für Netzgrößen mit drei bis acht Teilnehmern und parallelem Datenaustausch

Als **Zwischenfazit** lässt sich festhalten, dass die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Gesamtansatz für die Netzerkundung und den Datenaustausch prinzipiell mit vertretbaren Einschränkungen die gestellten Anforderungen und die daraus abgeleitete Forschungsfrage

**Lässt sich mit Hilfe des Funkstandards 802.15.4 in einem dynamischen mobilen Ad-hoc-Netz unter den genannten Randbedingungen ein zuverlässiger Austausch von GNSS-Rohdaten (Datenaustauschrate 1 Hz) realisieren?**

erfüllt. So ist die Datenaustauschrate von einem Hertz nicht für alle denkbaren Netztopologien für eine mittlere Anzahl von sechs Satellitenrohdatenpaketen realisierbar. Hierzu müsste



ausgehend von den Simulationsergebnissen die Datenaustauschrate auf ein halbes Hertz gesenkt werden, wobei die Verteilung der zufällig generierten Netztopologien auch nicht zwingend einer realistischen Verteilung der Netztopologien in Einsatzszenarien entspricht. Alternativ steht auch die Reduzierung der auszutauschenden Rohdaten zur Diskussion, da grundsätzlich auch vier Rohdatensätze für die Schwarmpositionierung ausreichen würden. Für diesen Fall sind die Simulationsergebnisse in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 5.7:** Übersicht Simulationsergebnisse Gesamtzeit für parallelen Datenaustausch bei vier Satelliten

Teilnehmer	3	4	5	6	7	8
Mittelwert [ms]	386	480	591	717	839	979
Maximalwert [ms]	405	533	725	917	1141	1429
< 1000 ms [%]	100	100	100	100	85	45

Für diesen Fall mit der minimalen auszutauschenden Datenmenge für jeweils vier Satelliten kann basierend auf den Simulationsergebnissen der vollständige Austausch von Rohdaten bis zu einer Netzgröße mit sechs Teilnehmern erfolgen. Für sieben und acht Teilnehmer liegt der Mittelwert noch unterhalb einer Sekunde, der Maximalwert bei rund 1,1 bzw. 1,5 Sekunden und 85 bzw. 45 Prozent der Fälle unterhalb einer Sekunde.

In strengen Linientopologien mit großen Abständen zwischen den Teilnehmern (vgl. Abschnitt 5.1) kann ein vollständiger Datenaustausch nicht erfolgen, in enger vermaschten Topologien hingegen schon. Die Netzerkundung jedoch gelingt in rund 94 Prozent der Fälle innerhalb von 35 Takten und bietet damit eine gute Ausgangsbasis, um z. B. durch paralleles Senden auf verschiedenen Übertragungskanälen Optimierungen beim Datenaustausch vorzunehmen.

## 6 Prototypische Umsetzung

Die prototypische Umsetzung erfolgte mitunter im Rahmen des Forschungsvorhabens NExt UAV, sodass an verschiedenen Stellen ein enger Bezug besteht. Zunächst erfolgt eine kurze Darstellung der Versuchsträger und des Gesamtsystemkonzepts. Anschließend wird ausführlich auf die softwareseitige Implementierung der Methode zum Datenaustausch eingegangen, bevor abschließend die Gesamtintegration in Bezug auf den zeitlichen Ablauf dargestellt wird.

### 6.1 Gesamtsystemkonzept

Bild 6.1 zeigt die für die Untersuchungen verwendeten realen Versuchsträger. Links, die am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig entwickelten und als comRoBS bezeichneten Bodenfahrzeuge, in der Mitte der vom DLR Institut für Flugsystemtechnik am Standort Braunschweig betriebene Kleinhubschrauber ARTIS und rechts die vom Institut für Flugführung der TU Braunschweig im Rahmen des Forschungsvorhabens angeschafften und ausgerüsteten Quadrokopter der Firma Ascending Technologies vom Typ Pelikan.



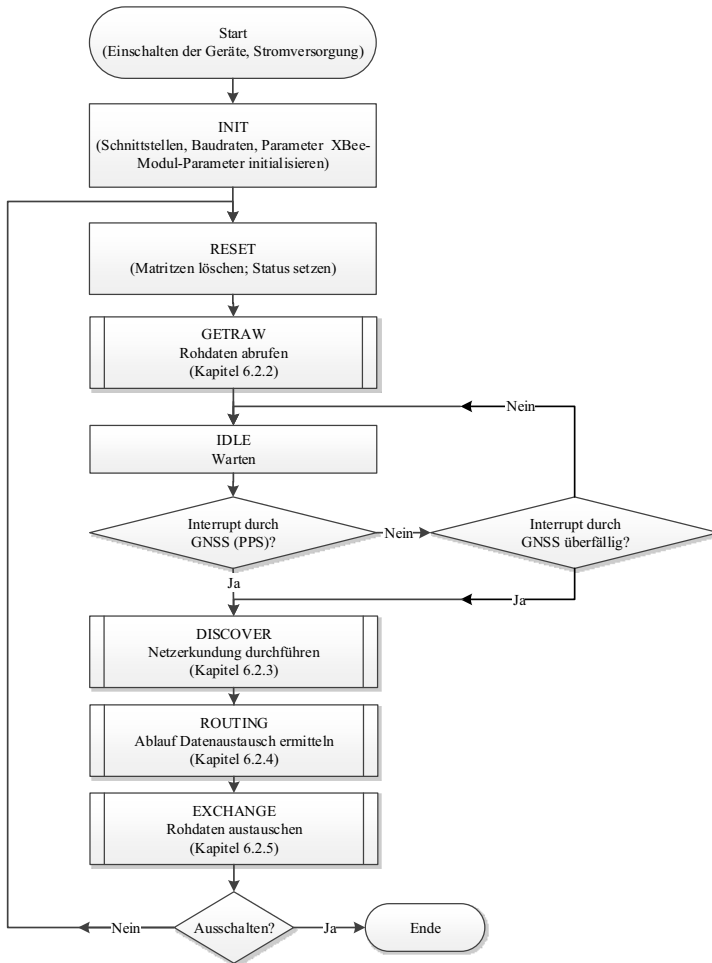
**Bild 6.1:** Eingesetzte experimentelle Versuchsplattformen – comRoBS (TUBS IMN)/ ARTIS (DLR BS) / Pelikan (Ascending Technologies)

Bild 6.2 zeigt das Gesamtsystemkonzept in einer schematischen Darstellung. Zu sehen sind der schematische Systemaufbau der drei verschiedenen Versuchsträger und der Bodenstation.



### 6.2.1 Gesamtablauf Kommunikationssoftware

Bild 6.3 zeigt den Gesamtablaufplan des für den Mikrocontroller entwickelten Programms als Flussdiagramm, beginnend mit dem Start durch das Einschalten des Systems bis hin zum Abschalten des Systems. Zunächst werden nach dem Start in einer Initialisierungsphase INIT einmalig verschiedene Parameter gesetzt, z. B. die Baudraten für die seriellen Schnittstellen für den Datenaustausch mit dem NAV-Rechner und dem XBee Modul, die Uhren initialisiert, das XBee-Modul ausgelesen bzw. parametrisiert (Sendeleistung, Identifier, Funkkanal, etc.) und der Trigger für die Synchronisierung der Kommunikation aktiviert. Anschließend werden sämtliche Matrizen und Speicher gelöscht, bevor im nächsten Programmschritt aktuelle Rohdaten *GETRAW* abgerufen und Informationen über die Rohdatenmenge extrahiert werden (vgl. Abschnitt 6.2.2). Anschließend geht das System in einen Wartezustand *IDLE* über, bis der Trigger durch das GNSS Modul erfolgt. Nach einmalig erfolgter Synchronisierung ermöglicht eine weitere zeitbasierte Überwachung zudem eine Fortsetzung des Programmablaufs ohne externen Trigger basierend auf einer internen Uhr (vgl. Abschnitt 6.2.3). Auf Grund der Ungenauigkeit der integrierten Uhr ist hiermit allerdings nur eine Überbrückung von wenigen Minuten realisierbar, bevor die Synchronität nicht mehr gegeben ist. Mit dem Interrupt wird die Unteroutine *DISCOVER* gestartet, also die eigentliche Netzerkundung, auf die im Abschnitt 6.2.3 näher eingegangen wird.



**Bild 6.3:** Gesamtablaufdiagramm Kommunikationssoftware

Nach einem zeitlichen Abbruchkriterium (vgl. Abschnitt 5.2) wird als Nächstes die Unteroutine *ROUTING* ausgeführt. In dieser wird zunächst das Ergebnis der Netzerkundung in Form der vorgestellten Adjazenzmatrix zusammen mit zusätzlichen Informationen über die Qualität der einzelnen Verbindungen sowie dem Umfang der bei den Teilnehmern vorhandenen Rohdaten an den PC übermittelt, um hier den optimalen Ablauf für den Datenaustausch zu berechnen. Das Ergebnis wird in Form einer Ablaufsteuerung vom NAV-Rechner zurückübermittelt. Diese Liste enthält alle notwendigen Informationen für den

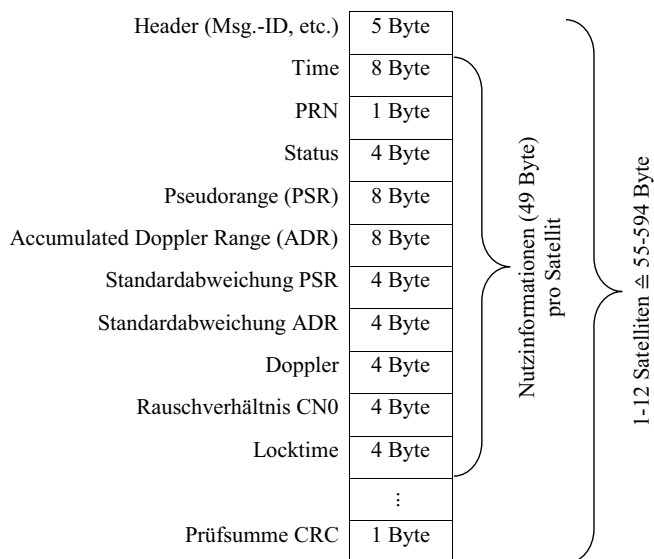
Datenaustausch, also in welchem Zeittakt welcher Teilnehmer welche Daten senden muss und wird der nächsten Unteroutine *EXCHANGE* übergeben und entsprechend abgearbeitet. Entscheidend ist, dass bei allen Teilnehmern dezentral aber auf Basis der gleichen Informationen derselbe Ablauf ermittelt wird, sodass es zu keinen Datenkollisionen kommt. Abschließend werden sämtliche ausgetauschten Rohdaten an den NAV-Rechner für die Nutzung für den Ansatz der Schwarmpositionierung vor Ablauf des Taktes übermittelt. Mit dem anschließenden Zurücksetzen aller Matrizen und Zwischenspeicher beginnt der Programmablauf von vorn.

### 6.2.2 Rohdaten abrufen *GETRAW*

Die Unteroutine *GETRAW* ruft die Rohdaten über die RS232 Schnittstelle vom PC (NAV, vgl. Bild 6.2) ab. Die Rohdaten werden im Vorfeld der Netzerkundung abgerufen, um aus dem Datensatz zunächst die Information über den Umfang der Rohdaten zu extrahieren, die der Anzahl der aktuell empfangenen Satelliten entspricht. Für den späteren Austausch werden diese zudem mit der eigenen ID versehen und abgespeichert.

Die GNSS-Rohdaten werden vom  $\mu$ -blox LEA 6T an den NAV-Rechner übermittelt und mittels des vom Institut für Flugführung entwickelten Softwareframeworks TriPos dekodiert und einem definierten **Datenprotokoll** folgend weitergegeben. Die Weitergabe der Rohdaten für den Austausch erfolgt über ein für diesen Zweck geschaffenes Hilfsprogramm (TPN2IOXBEE), welches die relevanten Rohdaten per UDP Verbindung empfängt, die Rohdatenpakete zusammenstellt, mit Statusinformationen anreichert, ggf. komprimiert und auf Anforderung an das Kommunikationsboard sendet bzw. die ausgetauschten Rohdaten empfängt und an das TriPos Softwareframework übermittelt. Zudem sind im Hilfsprogramm Routinen vorgesehen um eine Vorfilterung der Rohdaten vorzunehmen, z. B. die auszutauschenden Rohdaten nach dem Rauschwert zu sortieren und ggf. nur die „guten“ Rohdaten oberhalb eines bestimmten Schwellenwerts des Rauschverhältnisses auszutauschen.

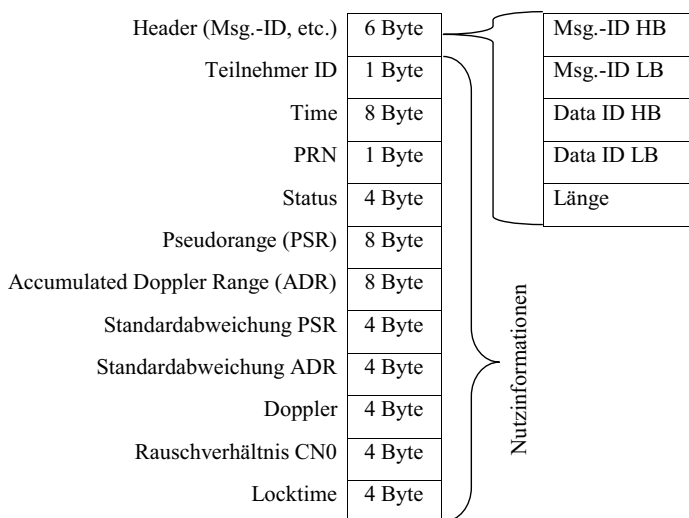
Jedes Datenpaket beginnt mit einem Header (bestehend aus 5 Bytes), der eine eindeutige Zuordnung erlaubt. Dieser wiederum besteht aus einer Nachrichtenbezeichnung (Msg.-ID), der Nummer des Teilnehmers (ID) und der Information über die Länge des Datenpakets. Im Anschluss an diesen Header folgen die relevanten Nutzinformationen und abschließend ein Byte für die Prüfsumme. Bild 6.4 zeigt diese in ihrer Reihenfolge und zugehörigem Datenumfang. Gegenüber der Darstellung in Tabelle 4.1 „Zusammenstellung Datensatz Rohdatenaustausch“ ist ein Rohdatensatz entsprechend um den Header und die Prüfsumme um sechs Byte größer. Ein Datenpaket umfasst dabei sämtliche Rohdaten der einzelnen Satelliten für einen Zeitschritt und umfasst somit zwischen 55 Byte (Header + 1 Satellit) und 594 Byte (Header + 12 Satelliten).



**Bild 6.4:** Nachrichtenstruktur Rohdatenaustausch (NAV-Rechner  $\leftrightarrow$  Mikrocontroller)

Das Datenprotokoll für die Rückgabe der Rohdaten nach dem Datenaustausch ist ähnlich aufgebaut. Die Rohdaten werden vom Mikrocontroller im Anschluss an den funkbasierten Datenaustausch jeweils in einem Datenpaket pro Teilnehmer an die NAV-Rechner übermittelt und vom Hilfsprogramm TPN2IOXBEE wiederum in Einzelnachrichten für jeweils einen Rohdatensatz pro Satellit zerlegt.

Die Nachrichtenstruktur für die Rückgabe der ausgetauschten Rohdaten an das IFF Softwareframework TriPos zeigt Bild 6.5. Der Header umfasst ebenfalls fünf Byte und enthält neben einer eindeutigen Message ID (2 Byte) noch eine Data ID (2 Byte), die die Nachricht als ausgetauschten Rohdatensatz für die Weiterverarbeitung kennzeichnet. Im Anschluss folgt das Längenbyte. Den Nutzinformationen (49 Byte) ist noch die Teilnehmer ID vorangestellt, um den Datensatz einem Teilnehmer zuzuordnen.



**Bild 6.5:** Nachrichtenstruktur Rohdatenaustausch (TPN2IOXBEE → TriPos)

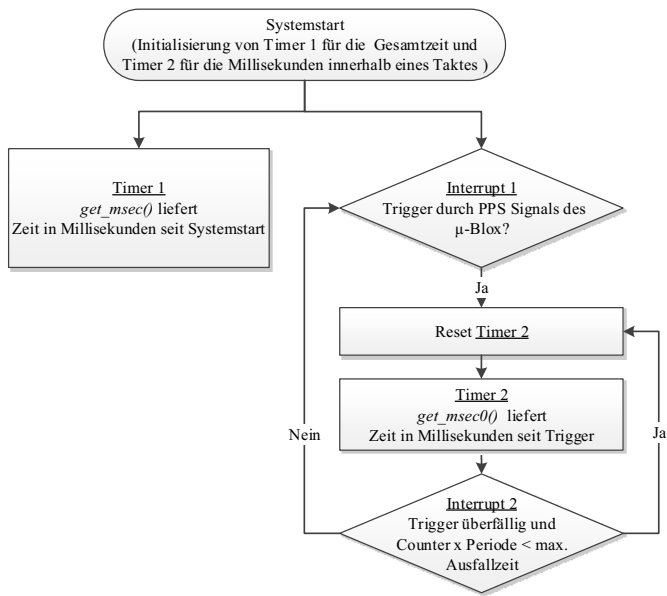
Um die auszutauschende Gesamtdatenmenge zu reduzieren, ist im Hilfsprogramm TPN2IOXBEE eine **Datenkompression** mittels des in Kapitel 5.4.3 vorgestellten verlustfreien Komprimierungsalgorithmus der Rohdaten vorgesehen, wozu die freie Bibliothek zlib [zlib17] implementiert wurde. Um zu vermeiden, dass bedingt durch den Algorithmus das Datenpaket größer anstatt kleiner wird, wurde im Programmcode eine Überprüfung implementiert, ob die Anzahl an Bytes durch die Komprimierung größer oder kleiner wird. Somit ist eine dynamische Entscheidung bzgl. der Durchführung einer Datenkomprimierung möglich. Insgesamt ist das Komprimierungspotential auf Grund der relativ geringen Datenmenge aber als eher gering einzustufen.



### 6.2.3 Synchronisierung und Zeitmessung

Für die **Synchronisierung** der Kommunikation wird einer der zwei am  $\mu$ -blox LEA 6T [ublo13] vorhandenen einstellbaren Taktausgänge genutzt. Dieser ermöglicht es, die Frequenz des Triggersignals ohne Auswirkung auf andere Module per Konfigurationssoftware ( $\mu$ -blox Center) bzw. entsprechenden Befehlssätzen anzupassen. Die Synchronisierung erfolgt über die Time of Week (TOW) der GPS-Zeit, sodass auch bei Frequenzen ungleich 1 Hz die Synchronität gewährleistet ist. Das Triggersignal entspricht einem TTL Signal (Transistor-Transistor-Logik) und wird über einen externen Interrupt des ATMEGA1284p ausgewertet.

Für **Zeitmessungen** auf dem Mikrocontroller werden zwei interne Timer konfiguriert und genutzt, wie es im Bild 6.6 veranschaulicht ist.



**Bild 6.6:** Synchronisation und Zeitmessung mit Timer 1 für die Systemlaufzeit und Timer 2 für die Laufzeit innerhalb eines Takts mit Überwachung auf Ausfall PPS Signal

Timer 1 liefert eine absolute Laufzeit in Millisekunden seit der Initialisierung des Moduls, Timer 2 wird mit jedem Triggersignal zurückgesetzt und dient somit zur Zeitmessung innerhalb einer Triggerperiode *PERIODE\_MS* (Standardwert: 1000ms). Für kurzfristige Ausfälle des Triggersignals, z. B. auf Grund des Verlusts einer Positionslösung im Falle einer

starken Abschattung, wird mittels des zweiten Timers das Triggersignal überwacht und bei einer Überschreitung der voreingestellten Periodenzeit *PERIODE\_MS* ein Pseudo-Triggersignal generiert. Voraussetzung hierfür ist, um die Synchronisierung zwischen den Versuchsträgern zu gewährleisten, dass mindestens eine Triggerung durch den  $\mu$ -blox LEA 6T vorausgegangen ist. Zudem gibt es eine zeitliche Befristung für die Dauer des Ausfalls des Triggersignals, da die Genauigkeit der internen Uhr, die auf einem einfachen Quarz basiert, nicht besonders hoch ist und relativ schnell eine Abweichung im Millisekunden Bereich auftritt.

### 6.2.4 Netzerkundung *DISCOVER*

Wie im Kapitel 5.2 vorgestellt, basiert die Netzerkundung auf einem zeitlich synchronisierten **taktbasierten Ablauf**, bei dem jedem Teilnehmer ein von seiner ID abhängiger Zeitslot zum Senden seiner Nachricht zugewiesen ist, wobei die ID aus der jedem Modul eigenen und einzigartigen Seriennummer abgeleitet wird. Nachstehendes Ablaufdiagramm in Bild 6.7 zeigt den prinzipiellen Ablauf.

Während der Netzerkundung *DISCOVER* wird zunächst überprüft, ob die aktuelle Taktzeit innerhalb des für die Netzerkundung vorliegenden Zeitfensters *PERIODE\_DISCOVER* liegt. Ist dies nicht der Fall, wird der nächste Programmabschnitt aufgerufen. Andernfalls wird zunächst der Eingangsdatenpuffer vom XBee-Modul ausgelesen und überprüft, ob ein gültiges Datenpaket vorliegt. Ist dies der Fall wird das Nachrichtenpaket entpackt und der Inhalt in einer Adjazenzmatrix abgespeichert, wobei neue Informationen mit schon vorhandenen Informationen kombiniert werden. Die Adjazenzmatrix „wächst“ somit sukzessive, wie es in Kapitel 5.2 an einem theoretischen Beispiel erläutert wurde. Anschließend erfolgt die Überprüfung, ob die aktuelle Taktzeit dem Sendezeitfenster der eigenen ID entspricht, nach folgendem Prinzip: Über die eindeutige ID für jeden Netzwerkknoten und dem Wissen wie lang eine Nachrichtenübertragung dauert (Time to Send (TTS), vgl. Kapitel 5.2), lassen sich Zeitintervalle berechnen, in denen die Netzerkundungsnachrichten versendet werden müssen, um Datenkollisionen zu verhindern. Die maximale Anzahl an Teilnehmern ist in dieser Umsetzung auf 8 Knoten beschränkt, sodass eindeutige IDs von 0 bis 7 vergeben sind.

Die Berechnung für den Zeitraum in dem es einem Netzteilnehmer gestattet ist Daten zu versenden, kann als Ungleichung in Abhängigkeit der ID angegeben werden:

$$ID \cdot TTS \leq \text{AktuelleTaktzeit} \leq ID \cdot TTS + 1 \text{ ms} \quad (6.1)$$

Für TTS wurde im Versuch ein Wert von 7 ms ermittelt, also vom Zeitpunkt des Absendens einer Nachricht bis zum Empfang der Nachricht und der anschließenden Verarbeitung, also bis zur Verfügbarkeit der Informationen.

Für die ID's 0 bis 7 bedeutet dies folgende Sendezeitfenster:

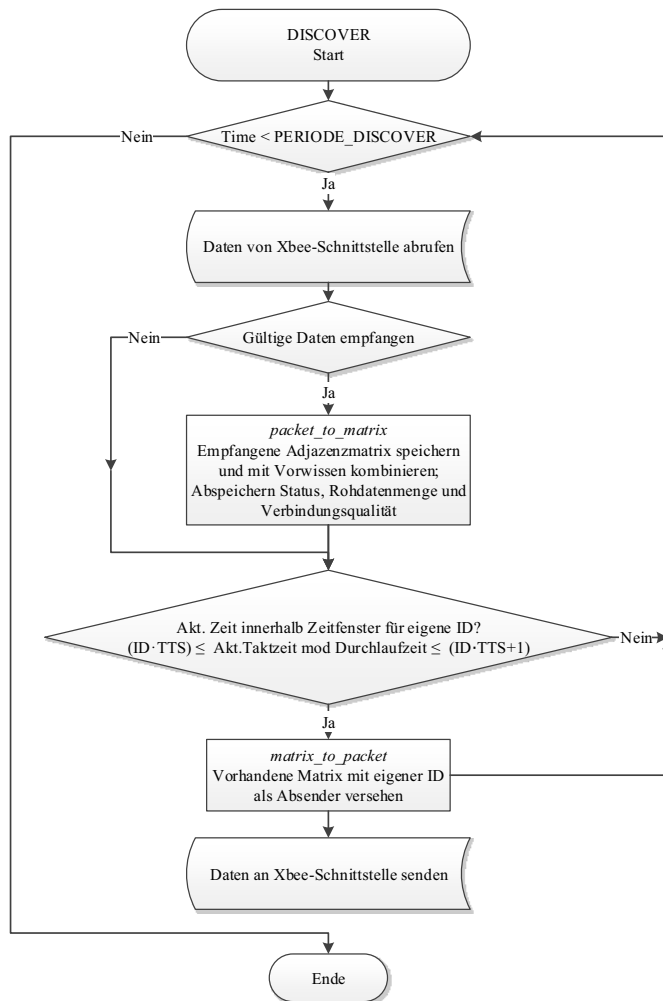
ID 0: Sendezeit zwischen 0 und 1 Millisekunden

ID 1: Sendezeit zwischen 7 und 8 Millisekunden

ID 2: Sendezeit zwischen 14 und 15 Millisekunden

...

ID 7: Sendezeit zwischen 49 und 50 Millisekunden



**Bild 6.7:** Ablaufdiagramm Netzerkundung

Anschließend beginnt wieder ID 0, die in der Zwischenzeit gesammelten Informationen zu versenden. Dazu ist eine Erweiterung der Ungleichung (6.1) notwendig, um nicht die absolute Taktzeit heranzuziehen, sondern die Zeit nach Beginn eines neuen Durchlaufs, wobei als ein Durchlauf verstanden wird, dass jeder Teilnehmer (bzw. jeder vorgesehene Teilnehmer) einmal gesendet hat. Für die Durchlaufzeit ergibt sich somit nach folgender Berechnung

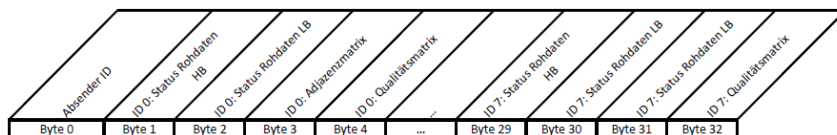
$$\text{Durchlaufzeit} = \max.\text{Anzahl\_Teilnehmer} \cdot TTS \quad (6.2)$$

$$\text{Durchlaufzeit} = 8 \text{ Teilnehmer} \cdot 7 \text{ ms} \quad (6.3)$$

eine Zeit von 56 Millisekunden. Dies kann durch die Modulo Operation, also eine Division mit der Rückgabe des ganzzahligen Rests erreicht werden:

$$ID \cdot TTS \leq \text{AktuelleTaktzeit} \bmod \text{Durchlaufzeit} \leq ID \cdot TTS + 1 \text{ ms} \quad (6.4)$$

Somit ergibt sich für die *AktuelleTaktzeit* 0 ms, 56 ms, 112 ms, 168 ms, ... das gleiche Ergebnis für die Ungleichung und somit für die Abfrage, ob ein Sendezeitfenster vorliegt oder nicht. Entspricht der Wert *AktuelleTaktzeit* nicht dem definierten Sendezeitfenster, beginnt die Schleife von vorn. Im anderen Fall wird die aktuell vorliegende Adjazenzmatrix mit der eigenen ID als Absender versehen und das Nachrichtenpaket an die XBee-Schnittstelle übermittelt. In der praktischen Umsetzung ist ein Nachrichtenpaket wie folgt aufgebaut, Bild 6.8:



**Bild 6.8:** Aufbau Nachricht für Netzwerkerkundung

Das Nachrichtenpaket beginnt mit der Absender ID. Danach folgen pro Teilnehmer jeweils vier Byte, also bei acht Teilnehmern insgesamt 32 Byte.

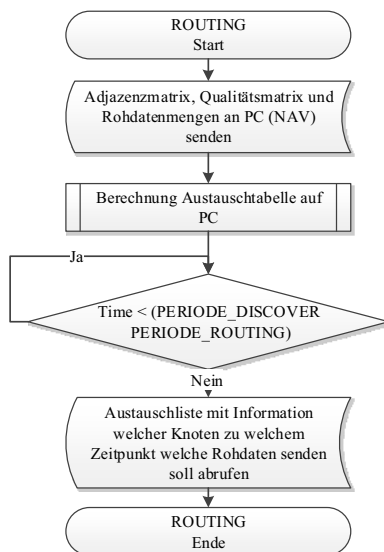
Byte 1 und Byte 2 enthalten Statusinformationen und die Rohdatenmenge. Das achte Bit des HighBytes enthält die Information, ob SBAS verfügbar ist und das fünfte Bit, ob die Rohdaten komprimiert wurden. Das 6te und 7te Bit sind Reserve und könnten noch weitere boolesche Informationen kodieren. Das LowByte enthält mit den unteren 4 Bits des HighBytes die Rohdatenmenge in Bytes, also als 12 Bit Wert (max. 4096).

## 6.2.5 Ermittlung Datenaustausch ROUTING

Als Basis für die Ermittlung der Ablaufsteuerung dient die beschriebene Adjazenzmatrix, welche alle Informationen über die Struktur des Netzwerks enthält. Eine weitere Eingangsgröße ist die zu verteilende Datenmenge pro Knoten, welche im direkten Zusammenhang mit der Anzahl der sichtbaren Satelliten der einzelnen Netzteilnehmer steht,

sowie die Verbindungsqualität, die herangezogen werden kann, um stabileren Verbindungen bei mehreren Möglichkeiten den Vorzug zu geben.

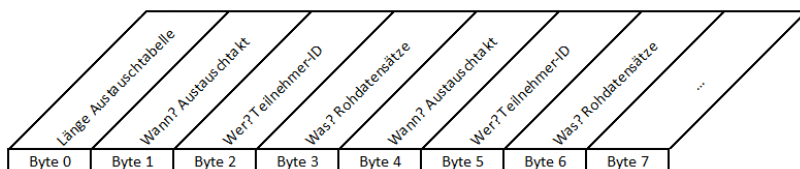
Da die Rechenleistung des verwendeten ATMEGA1284P zu gering ist, um die komplexen Berechnungen für den optimalen Ablauf des Datenaustauschs in möglichst kurzer Zeit zu ermitteln, wird diese auf den NAV-Rechner ausgelagert. Hierzu ist es notwendig, die Adjazenzmatrix mit der Information über den Umfang der auszutauschenden Rohdaten zusammen mit der Qualitätsmatrix an den NAV-Rechner zu übertragen. Das entsprechende Ablaufdiagramm dazu zeigt Bild 6.9.



**Bild 6.9:** Ablaufdiagramm Routing (Mikrocontroller)

Nach dem Start der Unterroutine *ROUTING* werden die Daten über die serielle Schnittstelle zum NAV-Rechner übertragen und in einer anschließenden Schleife auf die Rückübermittlung des Ergebnisses gewartet.

Der Ablaufplan wird in Form einer Tabelle *EXCH\_Data\_Tbl*, die nach folgendem Schema aufgebaut ist, abgespeichert:

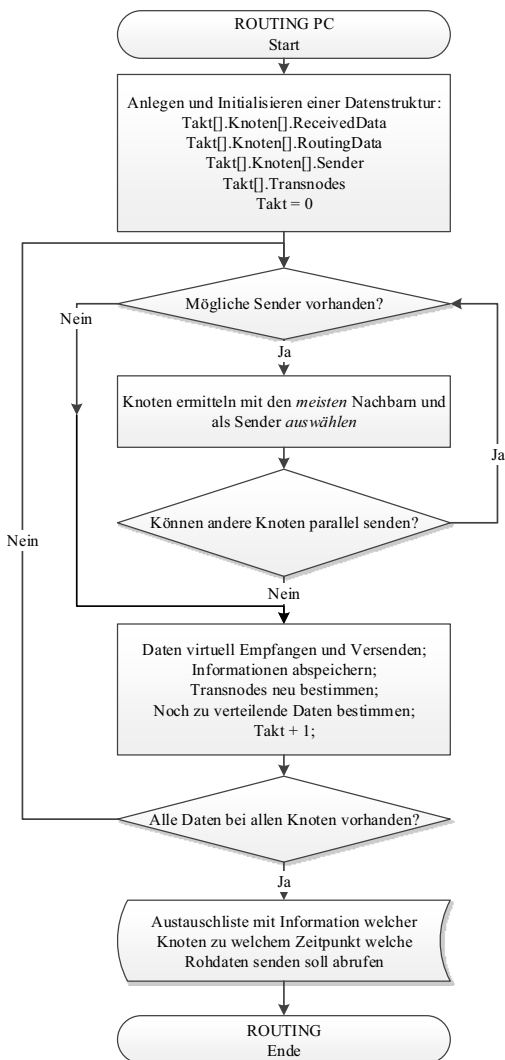


**Bild 6.10:** Schema Struktur Ablaufplan für Datenaustausch

Diese enthält im Byte 0 die Information über den Gesamtumfang des Ablaufplans. Anschließend folgen jeweils Blocks aus drei Bytes, die zusammengehören. Das erste Byte eines Dreierblocks enthält die Information, wann etwas gesendet werden soll, das zweite Byte, welcher Teilnehmer senden soll und das dritte Byte die Information darüber, von welchen Teilnehmern die Rohdaten gesendet werden sollen. Die beiden letztgenannten Bytes codieren die Information jeweils durch die einzelnen Bits.

Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf dem Routing liegt, wird an dieser Stelle auch nicht im Detail auf die Implementierung der Algorithmen eingegangen, sondern auf die in verschiedenen vorangegangenen eigenen Publikationen von SCHATTENBERG ET AL. ([Scha13a], [Scha14]) vorgestellten Ergebnisse verwiesen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet wurden und nur eine von vielen möglichen Vorgehensweisen für die Ermittlung der Abfolge für den Datenaustausch beschreiben. Wie eingangs dieses Unterkapitels dargestellt, findet diese Berechnung auf dem NAV-Rechner statt, der wesentlich leistungsfähiger als der Mikrocontroller ist und wird über einen Befehl im Hilfsprogramm TPN2IOXBEE ausgeführt. Bild 6.11 zeigt das Ablaufdiagramm für einen einfachen Algorithmus, bei dem weder die Datenmengen noch die Verbindungsqualität berücksichtigt sind.

Zu Beginn erfolgt zunächst die Initialisierung der benötigten Datenstruktur. Da im ersten Schritt alle Teilnehmer mindestens ihren eigenen Rohdatensatz weitergeben könnten, werden zunächst alle Teilnehmer als mögliche Sender markiert, sodass die folgende Abfrage, ob mögliche Sender vorhanden sind, im ersten Durchlauf auf jeden Fall zu einem positiven Ergebnis führt. Anschließend wird im exemplarisch gezeigten Routingalgorithmus nach dem Knoten mit den meisten Nachbarn gesucht und dieser als Sender ausgewählt. Da die IDs aufsteigend durchlaufen werden, ergibt sich somit die höchste ID mit den meisten Nachbarn als Sender. Anschließend wird überprüft, ob noch andere Knoten im gleichen Takt Sender sein können.



**Bild 6.11:** Ablaufdiagramm Routing (Beispiel für Routing auf PC)

Dieses ist möglich, wenn sich die Sendebereiche nicht überlappen (vgl. Hidden Station Problem), also keine gemeinsamen Nachbarn 2ten Grades existieren. Gibt es weitere mögliche Sender, wird nach dem gleichen Verfahren nach einem weiteren Sender gesucht, wenn nicht, werden die Daten virtuell ausgetauscht und für jeden Knoten in der Struktur für



den entsprechenden Takt abgespeichert, welche Informationen dieser besitzt und welche Informationen der Knoten noch senden muss. Hierfür wird verglichen, welche Informationen bei den benachbarten Knoten noch benötigt werden. Ebenfalls werden die möglichen Sender neu bestimmt, basierend darauf, ob Informationen zum Versenden vorhanden sind oder nicht. Anschließend beginnt der Durchlauf von vorne. Der Ablauf wiederholt sich so lange in einer Schleife, bis bei allen Knoten alle Informationen vorhanden sind. Das Ergebnis wird wie beschrieben im Anschluss mittels des Hilfsprogramms TPN2IOXBEE an den Mikrocontroller zur weiteren Verarbeitung übermittelt.

### 6.2.6 Austausch der Nutzdaten *EXCHANGE*

Der eigentliche Rohdatenaustausch basiert auf der im ROUTING ermittelten *EXCH\_Data\_Tbl* und verläuft nach dem in Bild 6.12 dargestellten Ablaufplan.

Zu Beginn der Schleife, die solange ausgeführt wird, bis die dafür vorgesehene Zeit verstrichen ist, wird zunächst überprüft, ob neue Rohdaten empfangen wurden. Im Anschluss wird überprüft, ob die eigene ID in der *EXCH\_Data\_Tbl* vorkommt. Ist der erste Eintrag mit der eigenen ID gefunden, so wird als Nächstes überprüft, ob die aktuelle Taktzeit der in der Liste eingetragenen Sendezeit entspricht. Ist dies nicht der Fall, werden ggf. empfangene Rohdaten abgerufen und zwar solange, bis die aktuelle Taktzeit der in der *EXCH\_Data\_Tbl* vorgegeben Sendezeit entspricht. Ist dies der Fall, so werden die im entsprechenden Byte (vgl. 6.2.5) codierten Rohdaten der entsprechenden Teilnehmer nach einer zusätzlichen Überprüfung auf Vorhandensein versendet und die entsprechenden Zählvariablen inkrementiert, um den nächsten vorgesehenen Sendezeitslot zu ermitteln. Zum Abschluss des Datenaustauschs erfolgt die Übermittlung aller gesammelten Rohdaten über das Hilfsprogramm TPN2IOXBEE an das Navigationsframework TriPos.

Die maximal versendbare Paketgröße (Nutzdaten) beträgt bei den verwendeten XBee-Modulen laut Datenblatt [Digi12] 100 Byte, sodass eine **Paketzerlegung** vorgesehen werden muss. Hierbei werden die einzelnen Rohdatenpakete, die ein Vielfaches davon umfassen können (55 bis 594 Byte) in Teilpakete zerlegt, versendet und wieder zusammengefügt. Dies geschieht über entsprechende Unterrouinen. Während die Routine für das Versenden das Rohdatenpaket in Pakete zu je 100 Byte und einen entsprechenden Rest zerlegt, überprüft die Routine für das Empfangen der Rohdaten zusätzlich mit Hilfe der vom Hilfsprogramm TPN2IOXBEE erstellten Checksum, ob die ausgetauschten Rohdaten fehlerfrei übermittelt wurden.

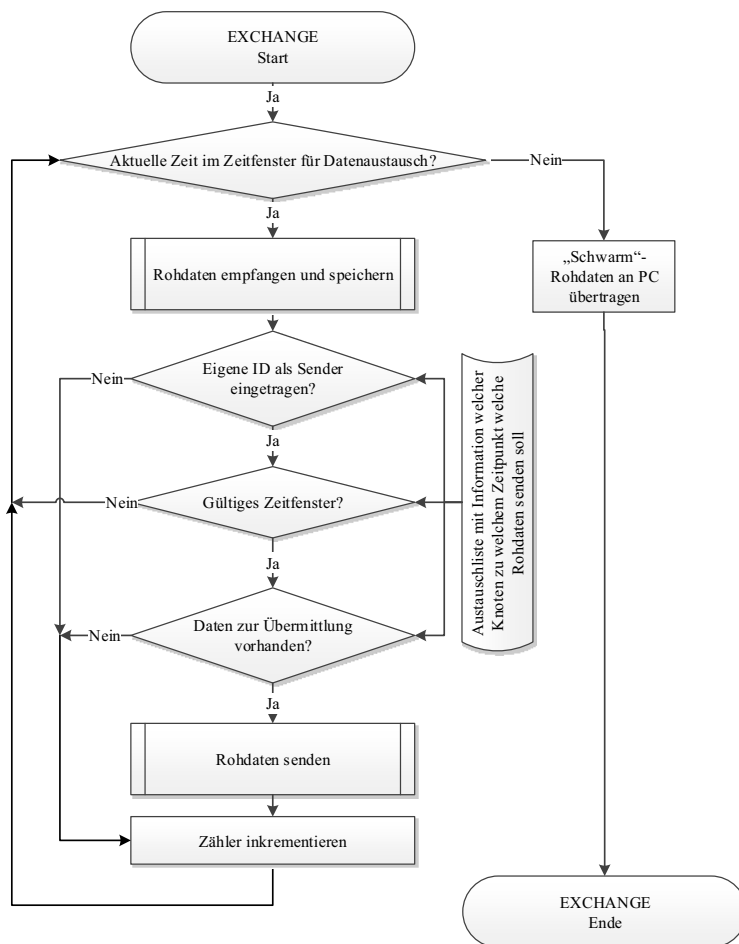
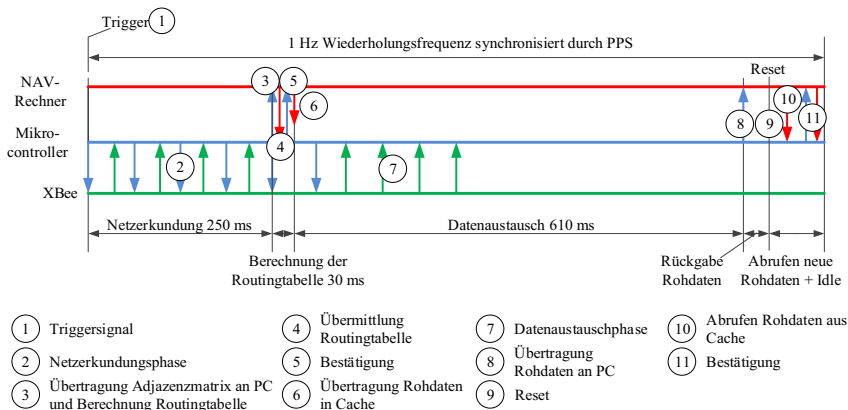


Bild 6.12: Ablaufdiagramm Datenaustausch

### 6.3 Zeitliche Gesamtintegration

Auf Grund der Randbedingungen stehen nur begrenzte Ressourcen zur Verfügung, die optimal genutzt werden müssen. Daher ist ein exakter zeitlicher Ablaufplan erforderlich, um die kurze Taktzeit optimal zu nutzen und wenn möglich einzelne Aufgaben parallel

durchzuführen. Nachdem in Bild 6.3 das Gesamtablaufdiagramm der Kommunikation gezeigt wurde, zeigt Bild 6.13 den Zeitstrahl für den Gesamtablauf.



**Bild 6.13:** Zeitstrahl Gesamtablauf für einen Takt mit Darstellung der Einzelschritte

Nach der zeitlichen Synchronisierung durch den Trigger (1) erfolgt zunächst die Netzkundungsphase DISCOVER (2), symbolisiert durch die gesendeten Nachrichten vom jeweiligen Teilnehmer und die empfangenen Nachrichten. Nach Ablauf der dafür vorgesehenen Zeit von 250 Millisekunden, die sich basierend auf den simulativen Untersuchungen als geeignet gezeigt hat, wird das Ergebnis über die serielle Schnittstelle (500 kbit/s) an den NAV-Rechner übertragen (3), die Routingtabelle berechnet und an den Mikrocontroller in der Form der beschriebenen *EXCH\_Data\_Tbl* übermittelt (4) sowie die Übermittlung bestätigt (5). Dies geschieht innerhalb von weiteren 30 Millisekunden. Zur optimalen Ausnutzung der Kapazitäten erfolgt anschließend die Übermittlung der neuesten Rohdaten in den Zwischenspeicher des Mikrocontrollers (6). In der anschließenden Datenaustauschphase (7) werden die GNSS und ggf. SBAS Rohdaten aus dem vorherigen Zeittakt zwischen den Schwarmteilnehmern wie beschrieben ausgetauscht und am Ende die gesammelten Informationen an den PC übermittelt (8). Anschließend werden alle Matrizen zurückgesetzt (9), die schon im Zwischenspeicher der seriellen Schnittstelle befindlichen Rohdaten (10) abgerufen und die benötigten Informationen bzgl. der Rohdatenmenge und der Verfügbarkeit von SBAS extrahiert. Dieser Austausch wird noch einmal bestätigt (11) und mit dem nächsten Trigger (1) beginnt der Ablauf mit der Netzkundungsphase erneut.

Wie im Zwischenfazit im Kapitel 5.5 angemerkt, ist ein Datenaustausch für mehr als sechs Teilnehmer in gestreckten Topologien, bei denen viele Datenpakete weitergeleitet werden müssen, innerhalb der gewünschten Updaterate von 1 Hertz auf Grund der beschränkten

Bandbreite nicht immer realisierbar. Durch eine Anpassung des von den GPS-Empfängern bereitgestellten Triggersignals lässt sich der Trigger-Takt jedoch softwareseitig auf einen anderen Takt, z. B. alle zwei Sekunden, umstellen. In der auf dem Mikrocontroller implementierten Software sind hierzu lediglich Anpassungen bei den hinterlegten Zeiten für die einzelnen Phasen vorzunehmen, der Gesamt Ablauf bleibt ansonsten unverändert.



## 7 Experimentelle Erprobung

Nachfolgend erfolgt eine kurze Darstellung der Versuchsgelände, der Art der durchgeführten Versuche und der Software zur Netzwerkanalyse, bevor auf die detaillierte Auswertung der Versuche eingegangen wird, die sich in eine direkte Auswertung der während der Versuche aufgezeichneten Daten für die Netzerkundung und eine indirekte Auswertung der Ergebnisse der Schwarmpositionierung untergliedert.

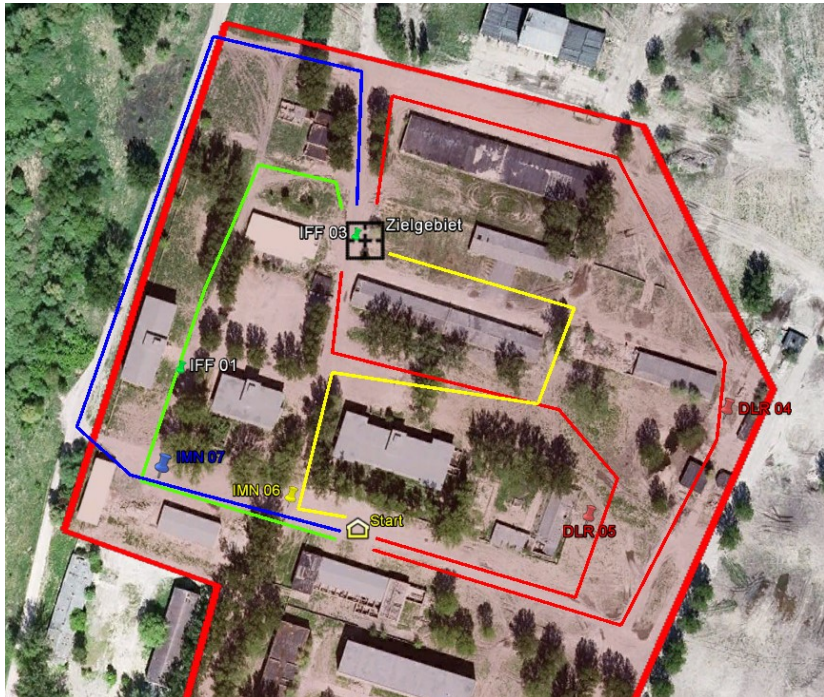
### 7.1 Versuchsgelände und Versuchsdurchführung

Die experimentelle Erprobung erfolgte in mehreren Stufen. Die erste Stufe, die überwiegend Bestandteil der Voruntersuchungen war, fand quasi im Labor statt und beschränkte sich rein auf die Grundfunktionen des Datenaustauschs und die Überprüfung der Funktionalität der Software, auf die nicht weiter eingegangen wird. Die experimentelle Erprobung des Gesamtsystems wurde im Rahmen der Versuche des Vorhabens NExt UAV durchgeführt und parallel zu den anderen Versuchen bzgl. der Navigation vorgenommen, da der Aufwand für dynamische Versuche mit einem Schwarm aus zwei Bodenfahrzeugen, drei bis vier Quadroptern und ggf. einem Kleinhelikopter (viele benötigte Personen bei der Versuchsdurchführung (mind. 1 „Pilot“ pro Versuchsträger und ggf. noch einen Assistenten)) sehr hoch ist. Nicht dynamische Versuche, die überwiegend für die Überprüfung der Grundfunktionalität genutzt wurden, lassen sich mit wesentlich geringerem Aufwand durchführen, allerdings ist die Aussagekraft dementsprechend eingeschränkt.

Für erste Versuche wurde ein Modellflugplatz in der Nähe von Hillerse (Niedersachsen) genutzt. Dieser war schnell zu erreichen, terminlich flexibel zu nutzen und ließ den Betrieb der genutzten Versuchsträger in einem weitläufigen Areal ohne nennenswerte Bebauung zu. Für die eigentlichen Versuche im Rahmen des Projekts mit Bezug auf Katastrophenszenarien in einem urbanen Szenario wurde ein Bereich des Versuchsgeländes Altmark (Sachsen-Anhalt) genutzt, der in seinem südlichen Abschnitt eine verlassene Kaserne mit Wegen und Straßen und bis zu vierstöckigen Gebäuden in einem Areal von ca. 400 Metern mal 400 Metern aufwies und etwas weiter nördlich ein weitläufiges Gelände mit teilweiser Bewaldung und einer Ausdehnung von ca. einem Quadratkilometer.

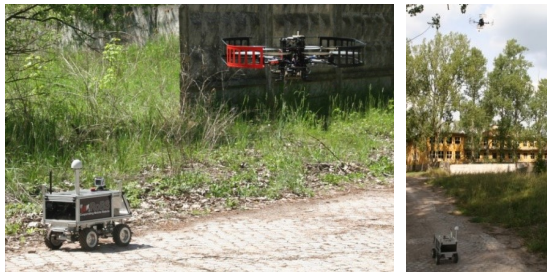
Bild 7.1 zeigt den Versuchsplan für ein urbanes Szenario auf dem genannten Versuchsgelände. Bei dem Versuch starten zwei Bodenfahrzeuge (IMN 06 und 07) sowie fünf Quadroptern (IFF 01, 02 und 03, DRL 04 und 05) bei dem mit einem gelben Haus markierten Startpunkt (knapp unter der Bildmitte) und bewegen sich auf verschiedenen Bahnen (farbige Linien) durch das Suchgebiet in Richtung des Zielgebiets. Auf Grund des

urbanen Szenarios sind dabei aus Sicht der Kommunikation stark wechselnde Netztopologien zu erwarten.



**Bild 7.1:** Versuchsplan in einem urbanen Szenario auf dem Versuchsgelände Altmark. Farbige Linien zeigen Wege der eingesetzten UAV und UGV (vgl. [HeBe13])

Bild 7.2 zeigt zwei der eingesetzten Versuchsträger während des Versuchs. In der im Bild gezeigten Szene steht z. B. weniger die Kommunikation im Vordergrund der Untersuchung, sondern vielmehr die Verbesserung der Positionslösung durch den Austausch der GNSS-Rohdaten, wenn sich z. B. UGV und UAV an einer ähnlichen Koordinate aber eben auf unterschiedlichen Höhen aufhalten und das UAV ggf. über Abschattungen verursachenden Gebäuden fliegt, wobei Letzteres prinzipiell auch die Kommunikation verbessern kann.



**Bild 7.2:** Boden- und Luft-Rover im Versuch (vgl. [HeBe13])

Zwei weitere Versuchspläne zeigen das Bild 7.3 und das Bild 7.4, in denen jeweils Suchszenarien mit unterschiedlichem Ablauf dargestellt sind. Im ersten Suchszenario „Perlenschnur“ bewegen sich alle Teilnehmer mehr oder weniger auf einer Linie mit ähnlicher Geschwindigkeit in gleiche Richtung wie es typischerweise auch bei der Suche nach vermissten Personen passiert. Da nicht alle Teilnehmer eine direkte Funkverbindung haben, sind die Anforderungen an die Kommunikation (vgl. 5.2) hoch.



**Bild 7.3:** Versuchsgelände Altmark – Szenario „Perlenschnur“ (vgl. [HeBe13])

Beim Suchszenario „Ausschwärmen und Formationsschluss“ wiederum befinden sich alle Teilnehmer zum Szenario-Start an der gleichen Position, bewegen sich dann voneinander weg und kommen am Ende an einem anderen Ort wieder aufeinander zu. Auf Grund der



Bewegungsmuster sind auch hier starke Wechsel der Netztopologie Bestandteil der Untersuchung.



**Bild 7.4:** Versuchsgelände Altmark – Szenario „Ausschwärmen und Formationsschluss“ (vgl. [HeBe13])

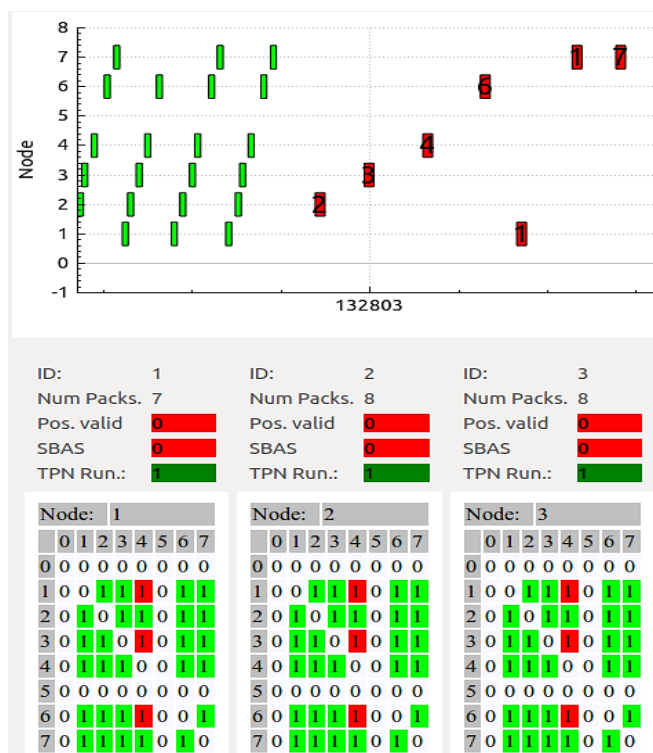
## 7.2 Software zur Versuchsdokumentation und Live-Analyse der Kommunikation

Zur Versuchsdokumentation wurde innerhalb des Hilfsprogramms TPN2IOXBEE die Möglichkeit vorgesehen, verschiedene Daten zu loggen und als Textfile auf dem NAV-

Rechner zur späteren Auswertung abzuspeichern. Von Bedeutung ist aus Sicht der Kommunikation und speziell für den Ansatz der Netzerkundung das Ergebnis der Netzerkundung. Diese wird in Form der vorgestellten Adjazenzmatrix abgespeichert und kann somit zur Auswertung im Postprocessing herangezogen werden.

Um während der Versuche die Möglichkeit zu haben, eventuelle Probleme in der Kommunikation zu erkennen, wurde zudem eine Software zur Netzwerkanalyse entwickelt, die das indirekte Mithören und die Visualisierung der Kommunikation ermöglicht.

Zur Visualisierung und Auswertung des Nachrichtenverkehrs im Netzwerk während der Versuche ist ein passiver Kommunikationsteilnehmer in das System integriert, über den alle „hörbaren“ Nachrichten aufgenommen werden, sodass eventuelle Probleme und Störungen schon während des Versuchs analysiert werden können. Dazu wird ein zusätzliches XBee-Modul genutzt, welches nicht an der eigentlichen Kommunikation teilnimmt, sondern nur die empfangbaren Nachrichten mithört und über eine extra geschriebene Software interpretiert und visualisiert. Bild 7.5 zeigt einen Screenshot, der als ComSniffer bezeichneten Software. Im oberen Teil der Abbildung ist ein Diagramm dargestellt, in dem auf der Abszisse die Zeit aufgetragen ist und auf der Ordinate die Teilnehmer IDs. Jede mitgehörte Nachricht der Netzerkundung wird in grün und jeder zusammenhängende Block von Nachrichten des Datenaustauschs wird in rot durch einen Balken visualisiert. Anzumerken ist, dass die Breite jedes Blocks, besonders bei der Datenübertragung, nicht die eigentliche Sendezeit widerspiegelt, sondern nur der Startzeitpunkt aus der ersten Nachricht des Nachrichtenpakets angezeigt wird. Gut zu erkennen ist die taktbasierte Netzerkundung mit den aufeinanderfolgenden Erkundungsnachrichten. In diesem Beispiel werden insgesamt sechs Versuchsträger eingesetzt (ID 1, 2, 3, 4, 6 und 7), sodass bei ID 5 ein Leertakt zu erkennen ist. Die fehlende Nachricht bei ID 7 ist der Tatsache geschuldet, dass der ComSniffer nur passiv mithört und sich ID 7 ggf. am Rand der Funkreichweite befunden hat oder durch andere Störungen die Nachricht nicht empfangen werden konnte.



**Bild 7.5:** Screenshot Netzwerkanalyse im Versuch (oben: Zeitstrahl mit einzelnen Erkundungsnachrichten (grün) und Rohdaten (rot), mittig Statusinformationen, unten: Adjazenzmatrizen zum aktuellen Zeitpunkt)

In der unteren Hälfte des Screenshots ist eine Visualisierung der Inhalte der Nachrichtepakete zu erkennen. Direkt unterhalb des vorgestellten Zeitstrahls wird neben der Teilnehmer ID die Anzahl der vorliegenden Rohdatenpakete (Num Packs.) dargestellt (hier 7 bei ID 1 und jeweils 8 bei ID 2 und 3). In den Zeilen darunter, ob eine gültige Positionslösung existiert (Pos. Valid), ob SBAS Korrekturdaten zur Verfügung stehen und ob die Softwarepakete auf dem NAV-Rechner ordnungsgemäß laufen (TPN Run).

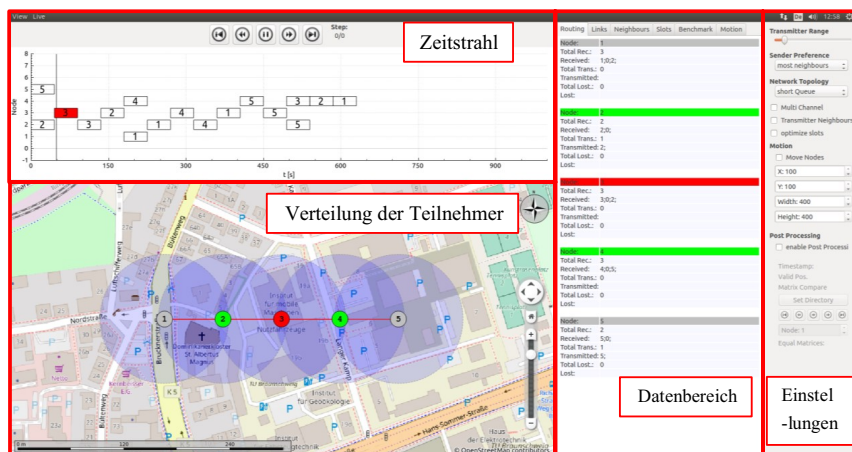
Wiederum darunter erfolgt die Darstellung der einzelnen Adjazenzmatrizen, die aus den mitgehörten Erkundungsnachrichten extrahiert werden. Die grün hinterlegten Einsen repräsentieren eine gute Verbindung zwischen den Teilnehmern, rot hinterlegte Einsen eine schlechte Verbindung und Nullen entsprechend keine bestehende Verbindung. Auffällig ist an dieser Stelle, dass Teilnehmer 4 die Teilnehmer 1, 3 und 6 schlecht empfängt, diese aber

Teilnehmer 4 gut empfangen. Dies ist mit einer ungleichen Sende- und Empfangscharakteristik der Module und der verwendeten Antennen zu erklären.

Für die der Netzerkundung nachgeordneten Frage nach dem optimalen Algorithmus für den Datenaustausch wurde auf Basis der in [Scha13b] vorgestellten Arbeiten ein **Simulator für den Datenaustausch** entwickelt, ohne darin die Netzerkundung zu betrachten. Dieser diente vor allem dazu verschiedene Algorithmen für den Datenaustausch für unterschiedliche Netztopologien miteinander zu vergleichen und einen geeigneten für die Implementierung auszuwählen. Ein Screenshot des Simulators zeigt Bild 7.6. Oben links ist in Anlehnung an den ComSniffer ein Zeitstrahl zu sehen, der den Rohdatenaustausch darstellt. In diesem Beispiel besteht der Schwarm aus den Teilnehmern 1 bis 5 und hat die unten links dargestellte Linientopologie in der Art einer Perlenschnur mit den schematisch dargestellten Sendereichweiten (blau hinterlegt), die der Einfachheit halber kreisförmig angenommen sind. Rechts im Bild daneben sind Informationen zu den einzelnen Teilnehmern (Nodes) dargestellt. Rot hinterlegt sind die gerade zu dem Zeitpunkt sendenden Teilnehmer, grün hinterlegt die empfangenden Teilnehmer und grau die aktuell unbeteiligten Teilnehmer. Auf dem Zeitstrahl wird jeweils über die Zahl angezeigt, welche Rohdaten welches Teilnehmers gesendet werden. Im dargestellten Beispiel sendet Teilnehmer 3 seine eigenen Rohdaten, die von den Teilnehmern 2 und 4 empfangen werden. Des Weiteren können folgende Informationen der Liste im Datenbereich des Simulators entnommen werden:

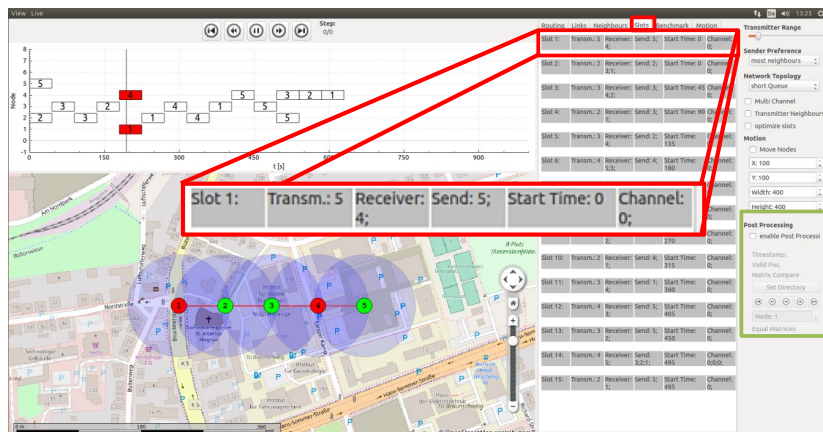
- Total Rec.: Anzahl empfangener Rohdatenpakete
- Received: ID der Rohdatenpakete die empfangen wurden
- Total Trans.: Anzahl gesendeter Rohdatenpakete
- Transmitted: ID der Rohdatenpakete, die gesendet wurden
- Total Lost: Verlorengegangene Rohdatenpakete
- Lost: ID der Rohdatenpakete, die verloren gegangen sind

Rechts in der Abbildung sind die Auswahlmöglichkeiten für das Generieren von Netzwerken zu sehen und es können Einstellungen bzgl. des Algorithmus zur Bestimmung der Abfolge des Datenaustauschs vorgenommen werden.



**Bild 7.6:** Screenshot Simulator für Datenaustausch

Über den Auswahlreiter „Slots“ (siehe Bild 7.7 – Rot eingrahmt) lässt sich eine leicht erweiterte Form der *EXCH\_Data\_Tbl* ausgeben, die zusätzlich die Informationen bereitstellt, welcher Teilnehmer Sender ist (Spalte 2), welche Teilnehmer die Daten empfangen (Spalte 3), welche Daten gesendet werden sollen (Spalte 4) und wann dieses passieren soll (Spalte 5).



**Bild 7.7:** Screenshot Simulator für Datenaustausch - EXCH\_Data\_Tbl

Ebenso sind die Informationen enthalten, welcher Teilnehmer Empfänger der Daten ist (Spalte 3). Die Ermittlung basiert auf den gleichen Algorithmen, sodass sich mit Hilfe des

Simulators im Vorfeld nachvollziehen und überprüfen lässt, ob das Ergebnis des Algorithmus plausibel ist. Die letzte Spalte „Channel“ ist für die als Option auswählbare Option „Multi Channel“ vorgesehen. Diese ermöglicht es zu simulieren, inwiefern sich die benötigte Zeit für den Datenaustausch reduzieren lässt, wenn dynamisch der Übertragungskanal der Funkmodule angepasst würde, um auf diese Weise paralleles Senden ohne gegenseitige Störung zu ermöglichen. Diese Funktion wurde auf Grund der Komplexität der Implementierung jedoch nur simulativ betrachtet. Die Funktion des parallelen Sendens für den Fall, dass Teilnehmer keinen gemeinsamen Nachbarn haben, wurde hingegen implementiert. Ein Beispiel hierfür ist ebenfalls dem im Screenshot dargestellten Datenaustausch zu entnehmen. In der dargestellten Linientopologie senden zunächst Teilnehmer 2 und 5 die eigenen Rohdaten, da diese keinen gemeinsamen Nachbarn haben und es sich gleichzeitig um die Teilnehmer mit den meisten Empfängern handelt. Danach senden abwechselnd Teilnehmer 3 und 2 jeweils eigene wie auch weitergeleitete Daten, bevor im fünften Zeitschritt erneut ein paralleles Senden von Daten durch Teilnehmer 1 und 4 erfolgt (dargestellte Momentaufnahme im Simulator; Sender im Zeitstrahl und Visualisierung rot eingefärbt, Empfänger grün eingefärbt). Zudem ermöglicht der Simulator auch aufgezeichnete Realdaten im Post Processing zu betrachten (grüne Markierung) und zu analysieren.

## 7.3 Versuchsauswertung

Die eigentliche Versuchsauswertung lässt sich wie schon angekündigt in zwei Bereiche, eine indirekte und eine direkte Auswertung, gliedern. Die indirekte Auswertung basiert auf den Ergebnissen der Schwarmpositionierung, die in [HeBe13] vorgestellt wurden sowie der Beobachtung und subjektiven Beurteilung der Visualisierung der Nachrichten im ComSniffer, der während der ersten Versuche genutzt wurde, um systematische Fehler zu entdecken. Die direkte Auswertung erfolgt basierend auf den während der Versuche aufgezeichneten Daten.

### 7.3.1 Direkte Auswertung Netzerkundung (Log-File XBee)

Für die direkte Auswertung der Versuche werden während der Versuche mittels des Hilfsprogramms TPN2IOXBEE in zwei Log-Files die relevanten Daten aufgezeichnet. Das eine speichert zu jedem Zeitschritt die vom Kommunikationsmodul übermittelte Adjazenzmatrix zusammen mit weiteren Daten nach dem in Bild 7.8 in Zeile 1 dargestellten definierten Format in einem Textfile auf dem NAV-Rechner ab. Es handelt sich um einen Ausschnitt aus einem Log-File. Die einzelnen Werte sind jeweils durch Tabs getrennt, sodass die Daten mittels z. B. Excel (wie im Bild zu sehen) oder Matlab eingelesen werden können. Die Trennung der einzelnen Datensätze für einen Zeitschritt erfolgt durch einen

Zeilenumbruch. Auf Grund von Initialisierungszeiten etc. wird der erste Datensatz in Takt 7 (Spalte M – Counter) angelegt und enthält die entsprechenden Adjazenzmatrix (Spalten B-I), wobei für jeden Knoten in einem Byte die entsprechenden Verbindungen codiert sind. In diesem Beispiel sind sieben Teilnehmer aktiv an der Kommunikation beteiligt und das Log-File zeigt die Informationen für Teilnehmer 2 (Spalte K). In Spalte R ist zu erkennen, dass noch keine Positionslösung vorliegt, insofern sind die Spalten O-Q (Longitude, Latitude, Altitude) für die Position auch ohne Wert. Ein sogenannter Fix für die Position liegt im Takt 32 bzw. 33 vor, also ca. 30 Sekunden nach Systemstart, sodass an dieser Stelle die entsprechenden Koordinaten und die Höhe eingetragen werden. In Spalte S wird zusätzlich die Information abgespeichert ob SBAS-Korrekturdaten empfangen werden und in Spalte T die Anzahl an empfangenen Satelliten.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Matrix	Node0	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6	Node7	Node	ID	Time	Counter	GPSTime	Long	Lat	Alt	Pos_true	SBAS_true	Num_Sat
2	M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	2	T	7	379337,000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0	12
3	M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	2	T	8	379338,000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0	8
4	M	:	:	:	:	:	:	:	:	N	2	T	:	:	:	:	:	:	:	:
5	M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	2	T	32	379362,000000	11,488932	52,279883	130,261058	0	0	1
6	M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	2	T	33	379363,000000	11,488931	52,279876	131,062406	1	0	8
7	M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	2	T	34	379364,000000	11,488931	52,279879	130,453764	1	0	4
8	M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	2	T	35	379365,000000	11,488926	52,279881	129,764231	1	0	10

**Bild 7.8:** Screenshot Beispiel Log-File XBee

Das andere Log-File speichert im Fall des Austauschs von Rohdaten ebenfalls in einem Textfile Informationen zu den empfangenen Rohdaten ab und ist nach folgendem Schema aufgebaut. Nach einem Datenkopf „RAW ID“ folgt zunächst die ID des Teilnehmers von dem die Rohdaten stammen, dann die PRN Nummer gefolgt von der GPS-Zeit (TOW), zu der die Rohdaten gehören und abschließend die GPS-Zeit, zu der die Rohdaten abgespeichert wurden. Die einzelnen Werte innerhalb einer Zeile sind auch hier durch Tabs separiert, zwischen wechselnden IDs ist jeweils eine Leerzeile eingefügt.

Datenkopf	ID	PRN	Zeitstempel Abspeicherung	Zeitstempel Empfang
RAW ID	3	24	306052.000467	306053.000036
RAW ID	3	17	306052.000467	306053.000036
RAW ID	3	26	306052.000467	306053.000036
RAW ID	3	18	306052.000467	306053.000036
RAW ID	3	12	306052.000467	306053.000036
RAW ID	3	11	306052.000467	306053.000036
RAW ID	7	24	306052.000033	306053.000036
RAW ID	7	17	306052.000033	306053.000036
RAW ID	7	26	306052.000033	306053.000036
RAW ID	7	28	306052.000033	306053.000036
RAW ID	7	12	306052.000033	306053.000036
RAW ID	7	22	306052.000033	306053.000036

**Bild 7.9:** Screenshot Beispiel Log-File RAW (ID, PRN, Zeitstempel Abspeicherung Rohdaten und Zeitstempel Empfangszeit)

Für die direkte Auswertung der Log-Files wurden die einzelnen Text-Files in Excel importiert. Dabei wurde für jeden Teilnehmer ein eigenes Tabellenblatt innerhalb einer Mappe angelegt, um die Rohdaten in einem Dokument zur besseren Verarbeitung zusammenzuführen. Im Anschluss wurde händisch der Zeitraum herausgesucht, in dem alle Teilnehmer aktiv sind und die Datensätze entsprechend eingekürzt, sodass bei allen Teilnehmern für die gleichen Zeitpunkte ein Datensatz zur Auswertung existiert. Die eigentliche Auswertung auf eine erfolgreiche Netzerkundung, wobei erfolgreich so definiert ist, dass bei allen Teilnehmern die gleiche Adjazenzmatrix vorliegt, erfolgt über einen Abgleich der Adjazenzmatrizen auf Gleichheit. Zur Darstellung der Versuchsdurchführung wurden bei den stationären Versuchen die gemittelte GPS-Position und bei den mobilen Versuchen die direkt aufgezeichneten GPS-Positionen der Teilnehmer in Google Earth Pro visualisiert.

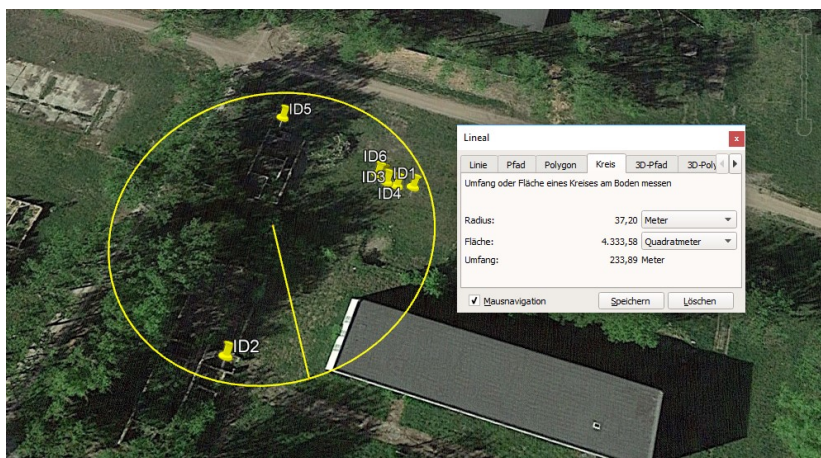
Nachfolgende Tabelle enthält die Versuchsdaten für **Versuch I** vom 16. Mai 2013, der neben dem Versuchsdatum und dem Versuchsort die Dauer und der Beginn sowie das Ende des durchgeführten Versuchs zu entnehmen sind. Ebenfalls ist eine Kurzbeschreibung der Versuchsart- und durchführung aufgeführt. Ergänzt wird die Tabelle durch eine Darstellung der Position bzw. des Pfades der Teilnehmer sowie die Angabe der Datenquelle.

**Tabelle 7.1:** Versuchsdaten 16.05.2013 Versuch I

<b>Versuch I</b>					
Versuchsdatum:	16.05.2013	Versuchsort	Versuchsgelände Altmark		
Versuchsbeginn:	ca. 9:20 Uhr	Versuchsende:	ca. 9:50 Uhr	Dauer:	ca. 30 Minuten
Versuchsart- /durchführung:	Stationärer Versuch: alle Teilnehmer nah beieinander innerhalb Kreis mit Radius ca. 37 Meter				

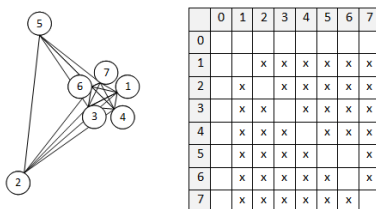


## Versuch I



Dateiname Auswertung: Versuchsauswertung\_20130516\_Altmark\_0922Uhr.xlsx

Bei diesem Versuch konnten insgesamt 1708 Takte, also ein Zeitraum von 1708 Sekunden entsprechend ca. 28,5 Minuten ausgewertet werden. Die Teilnehmer befanden sich während des Versuchs stationär am Boden innerhalb des in obiger Abbildung eingezeichneten Kreises mit einem Radius von ca. 37 Metern. Vom Szenario entspricht es dem Fall, dass jeder Teilnehmer jeden „sieht“ (Bild 7.10).



**Bild 7.10:** Netztopologie zu Versuch I mit 7 Teilnehmern als Graph (links) und Adjazenzmatrix (rechts) in einem stationären Versuch mit vollvermaschter Topologie

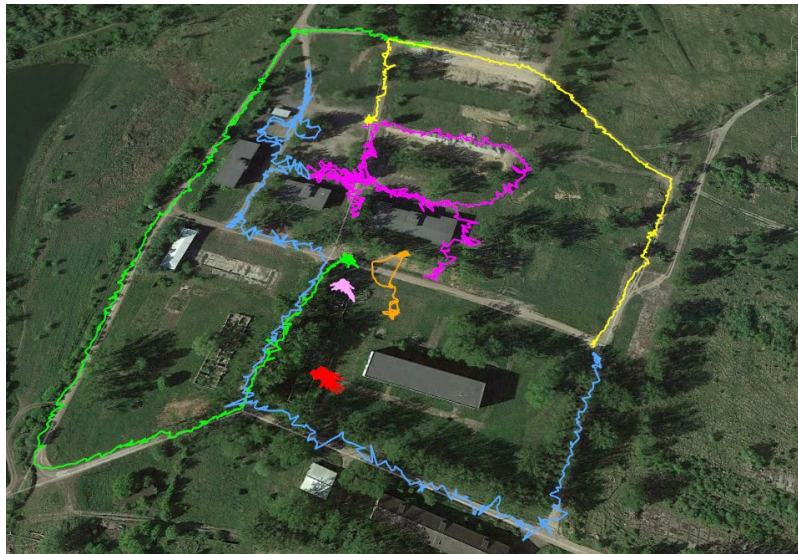
Insgesamt liegt bei 1683 der 1708 Takte bei allen Teilnehmern die gleiche Adjazenzmatrix vor, bei 25 Takten gibt es Unterschiede. Dies entspricht einer erfolgreichen Netzerkundungsquote von knapp 99 Prozent. Die Unterschiede sind vermutlich auf von extern

verursachten Störungen der Kommunikation in Form von Interferenzen mit anderen Funkaktivitäten zurückzuführen.

**Versuch II** unterscheidet sich insofern vom ersten Versuch, als dass ein Teil der Teilnehmer über das Versuchsgelände bewegt wurde. Nachfolgende Tabelle enthält die entsprechenden Versuchsdaten.

**Tabelle 7.2:** Versuchsdaten 16.05.2013 Versuch II

Versuch II					
Versuchsdatum:	16.05.2013	Versuchsort	Versuchsgelände Altmark		
Versuchsbeginn:	ca. 9:57 Uhr	Versuchsende:	ca. 10:10 Uhr	Dauer:	ca. 12 Minuten
Versuchsart- /durchführung:	Teilmobiler Versuch: 4 Teilnehmer (2 UAV (ID3 grün, ID1 gelb), 2 UGV (ID6 blau, ID7 pink)) bewegen sich durch das urbane Gebiet, 3 UAV stationär (ID5 rosa, ID2 rot) am Boden bzw. in der Luft (ID4 orange), Versuchszeit durch Flugzeit limitiert				



Dateiname Auswertung:	Versuchsauswertung_20130516_Altmark_0957Uhr.xlsx Versuchsauswertung_20130516_Altmark_0957Uhr_ext.xlsx
-----------------------	--

Bei diesem Versuch konnten insgesamt 695 Takte, also ein Zeitraum von 695 Sekunden entsprechend ca. 12 Minuten, begrenzt durch die Flugzeit der verwendeten Quadroptero, ausgewertet werden, bei denen bei allen Versuchsträgern Daten aufgezeichnet wurden. Drei

der Versuchsträger (UAV) wurden stationär betrieben, wovon zwei am Boden und eins stationär in der Luft gehalten wurden. Die zwei anderen UAV bewegten sich durch das urbane Gelände, ebenso die zwei UGV. Alle bewegten UXV bewegten sich auf unterschiedlichen Strecken auf den freien Platz links oben im Bild zu. In diesem Szenario war die Netztopologie nicht fix. Es war mit schwankenden Verbindungsqualitäten und demzufolge Veränderungen der Netztopologien zu rechnen auf Grund der Bewegung der Teilnehmer sowie Hindernissen auf Grund der Bebauung.

Insgesamt liegen bei 658 der 694 Takte bei allen Teilnehmern die gleichen Adjazenzmatrizen vor, bei 36 Takten gibt es Unterschiede. Dies entspricht einer Erfolgsquote von rund 95 Prozent.

Fasst man den Datensatz noch weiter und nimmt die Zeit dazu bis alle Systeme laufen und bis der letzte ausgeschaltet ist (Ein- und Ausschaltphase), umfasst der Versuch 872 Takte und somit ca. 15 Minuten. Die Anzahl an nicht gleichen Takten bleibt bei 36 Takten, sodass sich die Quote erfolgreicher Netzerkundungen auf rund 96 Prozent erhöht.

Daraus lässt sich folgern, dass die vermutlich kritische Phase, in der Teilnehmer dazu kommen oder sich abschalten bzw. ausgeschaltet werden, sehr stabil funktioniert.

Tabelle 7.3 enthält die Versuchsdaten für **Versuch III**, der dem zweiten Versuch von der Art ähnelt und sich nur in geringfügigen Variationen der Trajektorien der Versuchsträger sowie der Versuchsdauer und dem Versuchszeitpunkt unterscheidet.

**Tabelle 7.3:** Versuchsdaten 16.05.2013 Versuch III

<b>Versuch III</b>					
Versuchsdatum:	16.05.2013	Versuchsort	Versuchsgelände Altmark		
Versuchsbeginn:	ca. 11:06 Uhr	Versuchsende:	ca. 11:20 Uhr	Dauer:	ca. 14 Minuten
Versuchsart-/durchführung:	Teilmobiler Versuch: 4 Teilnehmer (2 UAV (ID3 grün, ID1 gelb), 2 UGV (ID6 blau, ID7 pink)) bewegen sich durch das urbane Gebiet, 3 UAV stationär (ID5 rosa, ID2 rot) am Boden bzw. in ca. 50 Meter über dem Boden in der Luft (ID4 orange), Versuchszeit durch Flugzeit limitiert				

**Versuch III**

Dateiname Auswertung:

Versuchsauswertung\_20130516\_Altmark\_1106Uhr.xlsx  
 Versuchsauswertung\_20130516\_Altmark\_1106Uhr\_kor.xlsx  
 Versuchsauswertung\_20130516\_Altmark\_1106Uhr\_ext.xlsx  
 Versuchsauswertung\_20130516\_Altmark\_1106Uhr\_ext\_kor.xlsx

Bei diesem Versuch konnten insgesamt 872 Takte, also ein Zeitraum von 872 Sekunden entsprechend ca. 15 Minuten ausgewertet werden inklusive der Ein- und Ausschaltphase. Insgesamt liegt bei 745 der 872 Takte bei allen Teilnehmern die gleiche Adjazenzmatrix vor, bei 127 Takten gibt es Unterschiede. Dies entspricht einer Quote von rund 85 Prozent. Bei einer Betrachtung nur der Takte, bei denen alle Teilnehmer aktiv sind (710 Takte, ca. 12 Minuten), liegt bei 623 Takten die gleiche Adjazenzmatrix bei allen Teilnehmern vor und in 87 Takten gibt es Abweichungen. Dies entspricht rund 88 Prozent.

Auffällig ist, dass die Hälfte der Abweichungen (39 Fehler) in den letzten 80 Takten des Versuchs entstanden ist. Eine genauere Analyse der Auswertung zeigt, dass die Adjazenzmatrizen bei den Teilnehmer IDs 3-7 jeweils gleich sind und abweichende Adjazenzmatrizen i. d. R. bei ID 1 vorliegen. Eine genaue Analyse zeigt, dass die Rohdaten von ID1 einen fehlenden Eintrag für die GPS-TOW-Zeit 386208 (siehe Bild 7.11) aufweisen wie es nachfolgendem Ausschnitt (Bild 7.11) aus dem Logfile zu entnehmen ist.

### Fehlender Datenpunkt bei 386208

M	0	252	242	242	238	158	158	126	N	1	T	669	386206.000000	11.489162	52.281370	126.977021	0	0	6
M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	1	T	670	386207.000000	11.489174	52.281364	126.163806	1	0	2
M	0	252	186	246	238	222	186	126	N	1	T	671	386209.000000	11.489186	52.281406	124.528923	1	0	2
M	0	252	186	246	238	222	186	126	N	1	T	672	386210.000000	11.489192	52.281435	119.230524	1	0	7

**Bild 7.11:** Screenshot Log-File-XBee ID1 (Xbee\_20130516\_1305\_01.txt) mit fehlendem Eintrag für den Zeitpunkt 386208

Bei allen anderen Teilnehmern gibt es für den Zeittakt eine Eintragung, jedoch keine Eintragung für ID1. Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass dieser Teilnehmer für den Zeittakt nicht aktiv an der Netzerkundung beteiligt war. Bild 7.12 zeigt dieses beispielhaft am Log-File von Teilnehmer 3 für die entsprechende GPS-TOW-Zeit 386208, bei der für Teilnehmer ID 1 eine 0 eingetragen ist.

### Vorhandener Datenpunkt bei 386208

M	0	252	242	242	238	158	158	126	N	3	T	669	386206.000000	11.488842	52.282713	124.663101	0	0	7
M	0	252	250	246	238	222	190	126	N	3	T	670	386207.000000	11.488903	52.282708	119.056653	1	0	1
M	0	194	244	236	220	184	124	N	3	T	671	386208.000000	11.488945	52.282708	119.324965	1	0	8	
M	0	252	186	246	238	222	186	126	N	3	T	672	386209.000000	11.488951	52.282707	122.570609	0	0	1
M	0	252	186	246	238	222	186	126	N	3	T	673	386210.000000	11.488926	52.282710	127.915131	1	0	10

**Bild 7.12:** Screenshot Log-File-XBee ID3 (Xbee\_20130516\_1306\_03.txt)

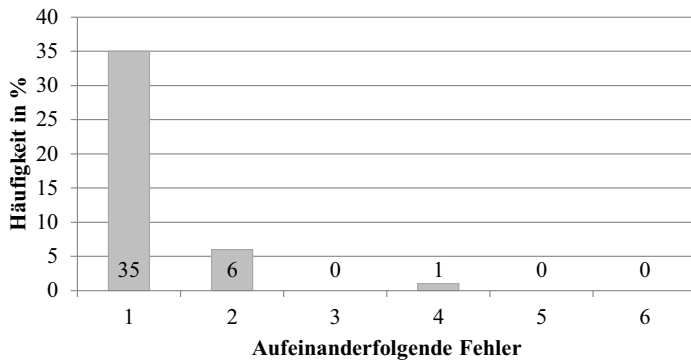
Da die Auswertung auf einem Vergleich der entsprechenden Zellen und nicht der Zellinhalte basiert, musste der Datensatz entsprechend korrigiert werden, um den richtigen Zellenbezug wiederherzustellen. Dieses wurde durch das Einfügen einer zusätzlichen Zeile für den entsprechenden Zeittakt in der Mappe mit den Daten von ID1 realisiert.

Die neue auf dem korrigierten Datensatz basierende Auswertung ergibt insgesamt bei 814 der 872 Takte die gleichen Adjazenzmatrizen und somit rund 93 Prozent, wobei nur 58 fehlerhafte Erkundungen auftreten. Eine Auswertung der Takte in denen alle Teilnehmer beteiligt sind, ergibt 709 Takte, wovon 658 Takte das gleiche Ergebnis liefern und somit ebenfalls rund 93 Prozent.

Die einzig schlüssige **Erklärung** ist, dass aus einem unbekannten Grund (ggf. Wackelkontakt, kurzfristig kein GPS-Fix und damit kein PPS) ein Takt auf dem Mikrocontroller doppelt so lange gedauert hat, also der Trigger nicht ordnungsgemäß stattgefunden hat, wie es auch indirekt den Log-Files der anderen Teilnehmer zu entnehmen ist. Es zeigt aber auch die Robustheit des Ansatzes, da die Netzerkundung für die verbliebenen Teilnehmer fehlerfrei funktioniert hat und im nächsten Zeitschritt auch Teilnehmer 1 wieder berücksichtigt wurde.

Die Datenauswertung zeigt darüber hinaus, dass i. d. R. auf eine fehlerhafte Netzerkundung eine erfolgreiche Netzerkundung folgt. Nachfolgendes Diagramm in Bild 7.13 zeigt für diesen Versuch die Verteilung der Fehler, also wie oft ein Fehler hintereinander auftritt. Auf der

Abszisse sind die maximal aufeinanderfolgenden Fehler aufgetragen, auf der Ordinate die Häufigkeit.



**Bild 7.13:** Fehlerverteilung im Versuch III

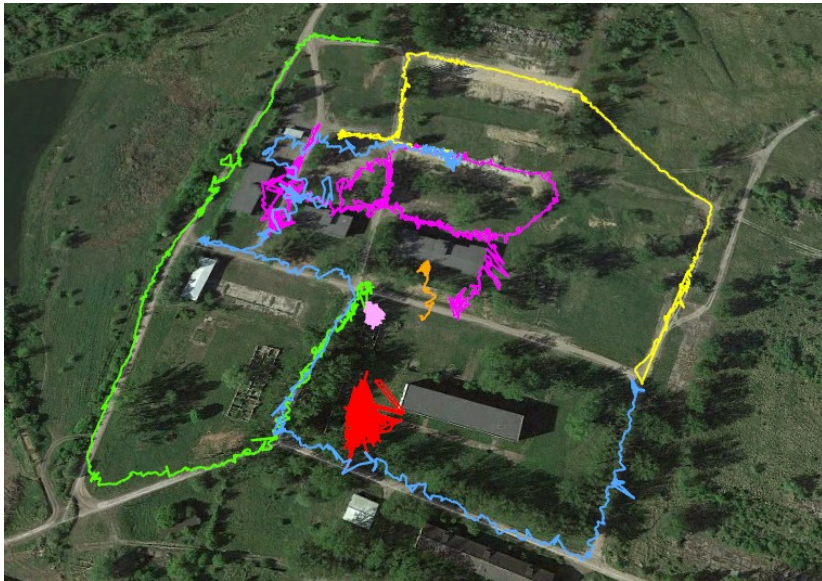
Gut zu erkennen ist, dass überwiegend Einzelfehler auftreten bzw. keine erfolgreiche Netzerkundung innerhalb der 250 Millisekunden erfolgt und somit der Datenaustausch selten über eine längere Zeit gestört ist, was als akzeptabel bewertet wird. Für diesen Versuch ist die max. Zeitspanne in der aufeinanderfolgende Fehler auftreten 4 Sekunden.



Die Versuchsdaten für **Versuch IV** sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst, der wiederum den beiden vorangegangenen Versuchen in seiner Art ähnelt.

**Tabelle 7.4:** Versuchsdaten 16.05.2013 Versuch IV

Versuch IV					
Versuchsdatum:	16.05.2013	Versuchsort	Versuchsgelände Altmark		
Versuchsbeginn:	ca. 11:45 Uhr	Versuchsende:	ca. 11:58 Uhr	Dauer:	ca. 13 Minuten
Versuchsart-/durchführung:	Teilmobiler Versuch: 4 Teilnehmer (2 UAV (ID3 grün, ID1 gelb), 2 UGV (ID6 blau, ID7 pink)) bewegen sich durch das urbane Gebiet, 3 UAV stationär (ID5 rosa, ID2 rot) am Boden bzw. in ca. 50 Meter über dem Boden in der Luft (ID4 orange), Versuchszeit durch Flugzeit limitiert				



Dateiname Auswertung:	Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1145Uhr.xlsx Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1145Uhr_kor.xlsx Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1145Uhr_ext.xlsx Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1145Uhr_ext_kor.xlsx
-----------------------	--

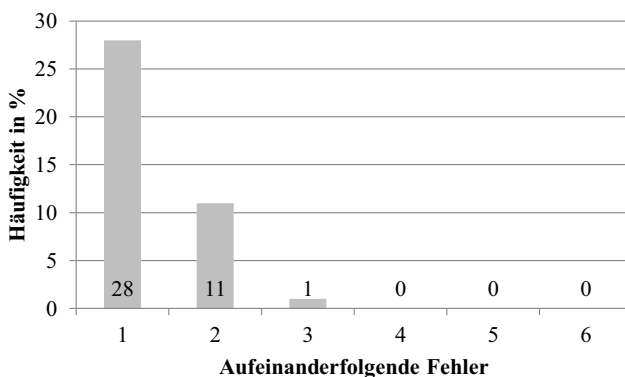
Bei diesem Versuch konnten insgesamt 845 Takte, also ein Zeitraum von 845 Sekunden entsprechend ca. 14 Minuten ausgewertet werden inklusive der Ein- und Ausschalphase.

Insgesamt liegt bei 514 der 845 Takte bei allen Teilnehmern die gleiche Adjazenzmatrix vor, bei 331 Takten gibt es Unterschiede. Dies entspricht einer Quote von nur rund 61 Prozent und ist somit auffällig niedrig (ohne Ein- und Ausschalphase 227 von 529 Takten  $\approx 43$  Prozent).

Bei der genauen Analyse der geloggtten Daten fällt auch hier der gleiche Fehler wie bei der Auswertung von Versuch III auf, dass bei ID1 zwar der bei jedem Trigger inkrementierte Zähler kontinuierlich um 1 ansteigt, jedoch nicht die geloggte GPS-Zeit. Für die GPS-Zeit (TOW) fehlt eine Eintragung im Log-File für die GPS-Zeit 387982. Ebenfalls existieren keine Einträge für die GPS-Zeiten 388010, 388020, 388062, 388071, 388106 und 388119.

Bei gleichem Vorgehen bei der Korrektur der Versuchsdaten wie beim vorherigen Versuch liegen nach Erzeugung zusätzlicher Einträge insgesamt bei 792 der 845 Takte die gleichen Adjazenzmatrizen vor ( $\approx 94$  Prozent), entsprechend nur 53 fehlerhafte Erkundungen. Auch die Verteilung der Fehler passt insgesamt mehr zu den vorangegangenen Versuchen. Eine Auswertung der Takte in denen alle Teilnehmer beteiligt sind, ergibt 529 Takte, wovon 482 Takte das gleiche Ergebnis liefern ( $\approx 91$  Prozent).

Da dieser Fehler erneut nur bei ID 1 auftritt, scheint es sich zudem um ein individuelles und kein prinzipielles Problem zu handeln. Bild 7.14 zeigt die Fehlerverteilung, basierend auf den korrigierten Daten, die der des vorangegangenen Versuchs ähnelt und vor allem Einzelfehler zeigt. Es liegt lediglich eine maximale Zeitspanne für aufeinanderfolgende Fehler von drei Sekunden vor, die zudem nur einmal auftritt.



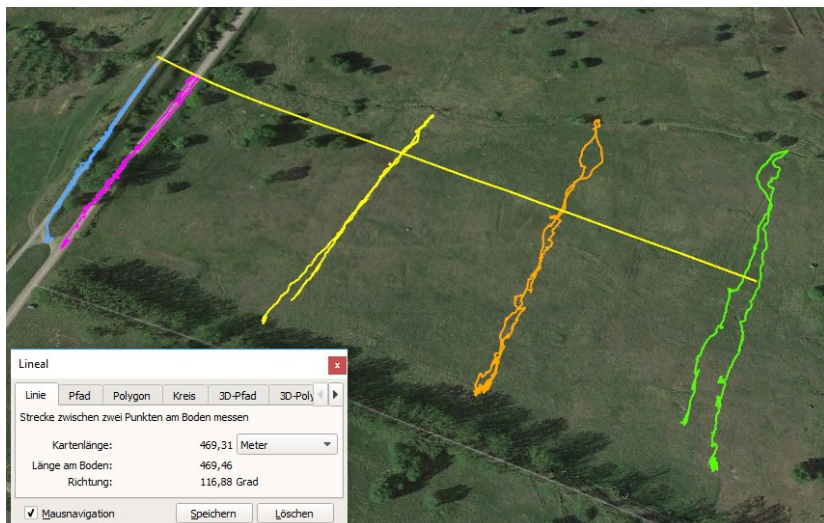
**Bild 7.14:** Fehlerverteilung im Versuch IV – Korrigierte Log-Files



Im **fünften Versuch** wurde der Versuchsort auf die freie Fläche auf dem Versuchsgelände verlegt und die Anzahl der Teilnehmer auf fünf Teilnehmer reduziert, wobei alle Teilnehmer bewegt wurden. Die Versuchsdaten für Versuch V sind in Tabelle 7.5 entsprechend zusammengefasst.

**Tabelle 7.5:** Versuchsdaten 16.05.2013 Versuch V

Versuch V					
Versuchsdatum:	16.05.2013	Versuchsort	Versuchsgelände Altmark		
Versuchsbeginn:	ca. 12:18 Uhr	Versuchsende:	ca. 12:27 Uhr	Dauer:	ca. 9 Minuten
Versuchsart-/durchführung:	Mobiler Versuch: 5 Teilnehmer (3 UAV (ID3 grün, ID1 gelb, ID4 orange), 2 UGV (ID6 blau, ID7 pink)) bewegen sich durch ein freies Gelände mit niedrigem Bewuchs. Die UAV durch das freie Gelände, die UGV auf zwei parallel zueinander verlaufenden Wegen. ID6 etwas erhöht auf einer Art Damm. Die Formation ist eine Perlenschnur mit einem max. Abstand von knapp 500 Metern. Die Teilnehmer bewegen sich in etwa auf einer Höhe vom Start Richtung Norden und wieder zurück.				



Dateiname Auswertung:	Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1218Uhr.xlsx Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1218Uhr_ext.xlsx
-----------------------	--

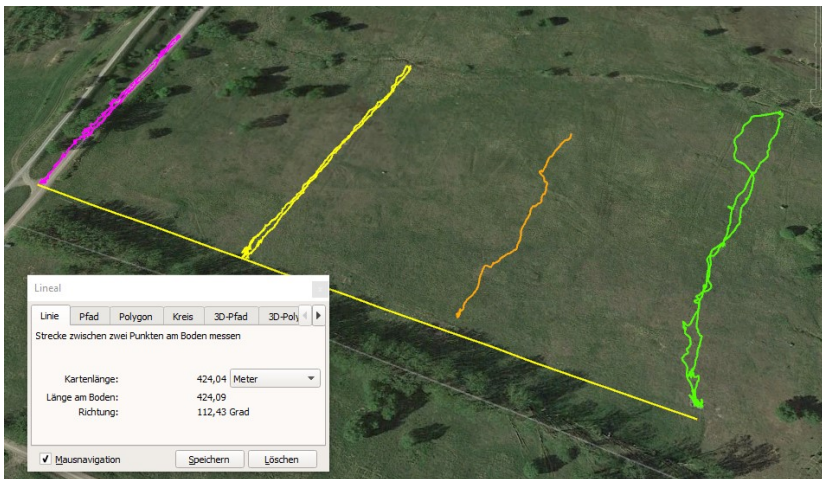
Bei diesem Versuch konnten insgesamt 517 Takte entsprechend einem Zeitraum von 517 Sekunden (ca. 9 Minuten) inklusive der Ein- und Ausschaltphase ausgewertet werden. Insgesamt liegt bei 476 der 517 Takte bei allen Teilnehmern die gleiche Adjazenzmatrix vor, bei 41 Takten gibt es Unterschiede. Dies entspricht einer Quote von nur rund 92 Prozent. Trotz der räumlichen Ausdehnung entspricht das Szenario aus Sicht der Kommunikation auf Grund der hohen Sendereichweite einem Szenario, in dem alle Teilnehmer direkt kommunizieren. Eine Betrachtung nur der Takte, in denen alle Teilnehmer aktiv sind, verändert das Ergebnis minimal zu rund 93 Prozent (492 Takte, 458 positiv).

In diesem Versuch konnte das Problem der vorangegangenen Versuche nicht festgestellt werden, was darauf schließen lässt, dass auf Grund der freien Fläche mit den insgesamt besseren Empfangsbedingungen der GPS-Receiver stabilere Triggersignale vorliegen und somit kein Ausfall auftritt.

**Versuch VI** entspricht dem vorangegangenen Versuch mit einer Reduzierung der Teilnehmerzahl. Nachfolgende Tabelle enthält die Versuchsdaten für diesen Versuch.

**Tabelle 7.6:** Versuchsdaten 16.05.2013 Versuch VI

Versuch VI					
Versuchsdatum:	16.05.2013	Versuchsort	Versuchsgelände Altmark		
Versuchsbeginn:	ca. 12:30 Uhr	Versuchsende:	ca. 12:39 Uhr	Dauer:	ca. 9 Minuten
Versuchsart-/durchführung:	Mobiler Versuch: 4 Teilnehmer (3 UAV (ID3 grün, ID1 gelb, ID4 orange), 1 UGV (ID7 pink)) bewegen sich durch ein freies Gelände mit niedrigem Bewuchs. Die UAV durch das freie Gelände, das UGV auf einem parallel verlaufenden Weg. Die Formation ist eine Perlenschnur mit einem max. Abstand von knapp 430 Metern. Die Teilnehmer bewegen sich in etwa auf einer Höhe vom Start Richtung Norden und wieder zurück. Bei ID4 liegt der GPS-Fix erst beim Umkehrpunkt vor.				



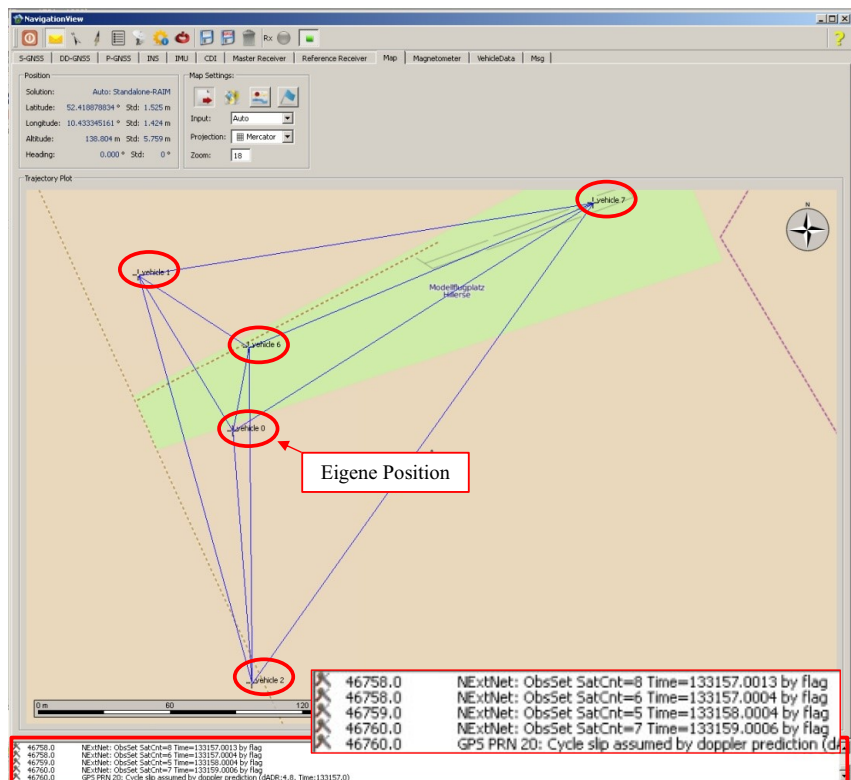
Dateiname Auswertung:	Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1230Uhr.xlsx Versuchsauswertung_20130516_Altmark_1230Uhr_ext.xlsx
-----------------------	--

Bei diesem Versuch konnten insgesamt 536 Takte, also ein Zeitraum von 536 Sekunden entsprechend ca. 9 Minuten ausgewertet werden. Insgesamt liegt bei 492 der 536 Takte bei allen Teilnehmern die gleiche Adjazenzmatrix vor, bei 44 Takten gibt es Unterschiede. Dies entspricht einer Quote von rund 92 Prozent. Eine Betrachtung nur der Takte, in denen alle

Teilnehmer aktiv sind, verbessert das Ergebnis leicht auf rund 96 Prozent (468 Takte, 400 positiv).

### 7.3.2 Indirekte Auswertung Schwarmpositionierung

Die indirekte Auswertung erfolgte basierend auf der eigentlichen Schwarmpositionierung, die durch das Institut für Flugführung mittels einer am IFF speziell entwickelten eigenen Software durchgeführt wurde. Bild 7.15 zeigt in einem Screenshot eine Momentaufnahme aus der Liveansicht für das Ergebnis der Schwarmpositionierung in der vom IFF entwickelten und als NavigationView bezeichneten Benutzeroberfläche.



**Bild 7.15:** Screenshot aus Liveansicht NavigationView (nach ([HeBe13]))

Diese ermöglicht es, sich live via TCP/IP mit einem der Versuchsfahrzeuge zu verbinden und die prozessierten Positionslösungen zu visualisieren. In der Abbildung ist eine Szene aus

einem Versuch auf dem Modellflugplatz Hillerse zu erkennen, bei der insgesamt fünf Versuchsträger (rote Markierungen) eingesetzt wurden, die sich entlang des grün eingezeichneten Flugfelds bewegen. Dargestellt wird die eigene Position (vehicle 0) sowie die Position aller anderen Schwarmteilnehmer basierend auf den ausgetauschten Rohdaten. Die dazugehörigen relativen Positionen zwischen den einzelnen Teilnehmern werden durch die blau dargestellten Verbindungslinien repräsentiert und sind somit indirekt ein Nachweis darüber, dass die Kommunikation als Ganzes funktioniert. Die GUI ermöglicht es live während eines Versuchs die Bewegung der Teilnehmer zu beobachten. Der vergrößerte Ausschnitt unten rechts zeigt den in rot eingerahmten Bereich aus Bild 7.15 vergrößert, in dem die entsprechenden Einträge für den Empfang von Rohdaten mit dem entsprechenden Zeitstempel zu erkennen sind (eingerahmt). Subjektiv konnte während der Versuche eine gleichmäßige Bewegung der Teilnehmer in der GUI beobachtet werden, die auf einen kontinuierlichen Datenaustausch schließen lässt, da ohne einen gleichmäßigen Datenaustausch keine Prozessierung der Schwarmpositionierung möglich ist.

## 8 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

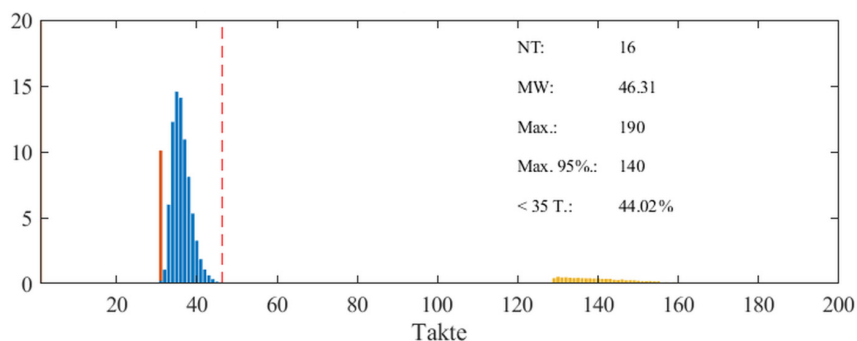
Sowohl die simulativen Untersuchungen der Methode zur Netzerkundung wie auch die praktisch durchgeführten Feldversuche zeigen, dass es möglich ist, **basierend auf dem Funkstandard 802.15.4 in einem dynamischen mobilen Ad-Hoc-Netz unter den besonderen Anforderungen einen zuverlässigen Austausch von GNSS-Rohdaten zu realisieren**. Bzgl. der gewünschten Austauschrate der Rohdaten existieren für gewisse Netzgrößen und -topologien gewisse Einschränkungen, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

Der entwickelte und untersuchte Ansatz zur Netzerkundung ist in der Lage in rund 90 Prozent der Fälle selbst komplexe Topologien zuverlässig und innerhalb einer sehr kurzen Zeit von 250 Millisekunden zu erkunden. Die Festlegung der vorgesehenen Zeit für die Netzerkundung erfolgte unter Abwägung der Gesamtanforderung und der simulativ ermittelten Zeiten. Der Datenaustausch selbst kann bei Topologien mit zentralen Kommunikationsteilnehmern ebenfalls in der noch zur Verfügung stehenden Zeit realisiert werden. In flachen Topologien, wie z. B. bei einer strengen Linientopologie, in Verbindung mit vielen Teilnehmern, ist die zur Verfügung stehende Bandbreite der ausgewählten Funkmodule nicht ausreichend für einen vollständigen Datenaustausch. Eine Absenkung der Austauschrate auf ein halbes Hertz erhöht den Erfüllungsgrad jedoch deutlich auf nahezu 100 Prozent. Bei weit gestreckten Topologien mit mehreren 100 bis 1000 Metern Distanz zwischen den einzelnen Teilnehmern sind zudem die Grundannahmen für die Schwarmpositionierung, die auf der Annahme der gleichen Ungenauigkeiten der absoluten Position basiert, nicht mehr uneingeschränkt gegeben, sodass für diese Fälle ein Austausch der Rohdaten in kleineren Untergruppen sinnvoll wäre.

Die praktischen Versuche haben die theoretischen Untersuchungen in Bezug auf die Netzerkundung bestätigt. Durch die Einführung und Berücksichtigung einer Qualitätsmatrix für die Berechnung der Routingpfade, die auf der Auswertung der empfangenen Signalstärke bei der Netzerkundung basiert und in Abhängigkeit eines definierten Schwellenwerts zwischen einer guten und einer weniger guten Verbindung unterscheidet, konnte die Quantität des erfolgreichen Rohdatenaustauschs noch einmal deutlich verbessert werden. Dazu musste das Format der Erkundungsnachrichten um acht Bytes erweitert werden. Die zusätzliche Übermittlung der Information über die auszutauschende Rohdatenmenge während der Netzerkundung und die Berücksichtigung dieser für die Berechnung der notwendigen Zeiten zum Rohdatenaustausch führten zu einer weiteren Optimierung. Abzuwägen war hierbei die dadurch ansteigende Zeit für die Netzerkundung auf Grund der benötigten längeren Taktzeit gegenüber der erhöhten Robustheit, wobei letztere ausschlaggebend war.

Die Methode wurde in dieser Arbeit für ein Netzwerk mit acht Teilnehmern angewendet, eine Erweiterung des Ansatzes auf eine größere Teilnehmerzahl ist denkbar, allerdings ist zu berücksichtigen, dass mit einer größeren Teilnehmerzahl auch die Größe der auszutauschenden Adjazenzmatrizen und somit die Zeit für eine auszutauschende Netzerkundungsnachricht deutlich ansteigt. Eine Verdopplung auf sechzehn Teilnehmer bedeutet eine Vervierfachung der benötigten Bytes zur Codierung der Adjazenzmatrix. Da zusätzlich auch die Größe der eingeführten Qualitätsmatrix im gleichen Maße ansteigt, führt dies insgesamt zu einer deutlichen Verlängerung der zu berücksichtigen Zeit pro Nachricht von ca. sieben auf ca. zehn Millisekunden. Somit ergibt sich ein deutlicher Anstieg der benötigten Zeit zur Netzerkundung. Je nach Applikation kann der Ansatz aber dennoch sinnvoll angewendet werden. Beispiele hierfür sind größere Schwärme mit geringer Dynamik bei denen lediglich ein Austausch von Statusinformationen mit einer geringeren Updaterate erforderlich ist oder wenn z. B. kein Rohdatenaustausch erfolgen soll, sondern lediglich jeder Teilnehmer seine Positionslösung, ggf. mit der Erkundungsnachricht, verteilt.

Bild 8.1 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Simulation von 50000 Topologien mit 16 Teilnehmern, bei der die Verteilung der drei Fälle wiederum nach dem schon verwendeten Schlüssel (10 Prozent vollvermaschte (rot), 10 Prozent minimalvermaschte (gelb) und 80 Prozent zufällige Topologien (blau)) erfolgt ist.



**Bild 8.1:** Simulationsergebnisse 50000 zufällig generierter Netztopologien für Netzgröße mit 16 Teilnehmern (NT), Häufigkeit in Prozent (Y-Achse) über benötigten Erkundungstakten (X-Achse), Mittelwert (MW), Maximalwert (Max.), 95% Maximalwert (Max 95%), Erkundete Netztopologien unter Grenzwert von 35 Takten (< 35 T.)

Im Mittelwert werden in diesem Fall rund 46 Erkundungstakte benötigt, wobei deutlich erkennbar ist, dass es eine Konzentration im Bereich zwischen 30 und 40 Takten gibt und

einen weiteren, mit geringerer Häufigkeit vorkommenden Bereich, zwischen 130 und 150 Takten. Dieser ist vollständig auf die Linientopologien mit minimaler Vermaschung zurückzuführen. Im Maximum werden 190 Takte für die Erkundung benötigt, 95 Prozent der Topologien werden in maximal 140 Takten erkundet. Dieses würde bei zehn Millisekunden Taktzeit 1,4 Sekunden für die Netzerkundung bedeuten. Ohne die Betrachtung der Linientopologien liegt der Wert bei ca. 45 Takten und entsprechend bei 450 Millisekunden.

Der große Vorteil der vorgestellten Methode zur Netzerkundung liegt insbesondere darin, vorhersagbar zu sein. Somit lässt sich schon im Vorfeld basierend auf der Simulation eine Aussage über die benötigten Erkundungszeiten treffen. Die Anpassung von Parametern erlaubt eine Adaption an anwendungsspezifische Anforderungen, zudem haben die praktischen Versuche eine sehr hohe Robustheit gezeigt.





## 9 Zusammenfassung

Der Datenaustausch ist eine wesentliche Voraussetzung für eine kooperative Zusammenarbeit von automatisierten bis hin zu autonomisierten Maschinen und muss unterschiedlichste Anforderungen erfüllen. Diese reichen vom niederfrequenten Austausch von Statusinformationen mit geringem Datenumfang über Distanzen von wenigen Metern, über große Datenmengen und große Entfernungsbereiche bis hin zum hochfrequenten Austausch von z. B. Positionsdaten. Daneben spielen weitere Randbedingungen eine entscheidende Rolle, z. B. ob das Kommunikationsnetz spontan gebildet wird, die Teilnehmer statisch und bekannt oder dynamisch und wechselnd sind und ob auf feste Infrastruktur zurückgegriffen werden kann. Die Spannweite an unterschiedlichen Anforderungen ist dabei sehr groß und erfordert häufig sehr individuelle Lösungen abseits der Standardlösungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode vorgestellt, den hochfrequenten Datenaustausch in einem dynamischen Netzwerk ohne feste Infrastruktur und somit ohne Koordinator zu realisieren. Als Anwendungsbeispiel dient dazu der Datenaustausch von GNSS-Rohdaten und Statusinformationen in einem Verbund von mobilen boden- und luftoperierenden Einheiten mit dem Ziel der kooperativen Ortung, die als Schwarmpositionierung bezeichnet wird. Die Methode basiert auf einem taktbasierten Ansatz zur Netzerkundung, bei dem jeder Teilnehmer in Abhängigkeit seiner Identifikationsnummer zu einem festen Zeitpunkt seine Nachricht senden darf. Die dazu notwendige Synchronisierung aller Teilnehmer erfolgt über die GPS-Zeit. Gegenüber anderen vorgestellten Technologien weist dieses Konzept einen minimalen Datenoverhead auf und nutzt die zur Verfügung stehende Kapazität der Funkstrecke möglichst optimal aus.

Zur Ermittlung des Einflusses der Netzgröße, der Netztopologie, von Nachrichtenverlusten auf Grund externer Störungen sowie der auszutauschenden Datenmenge wurde ein Simulationsmodell der Netzerkundung und des Datenaustauschs aufgebaut. Dieses wurde an Hand von einzelnen realen Versuchen abgeglichen und im Anschluss genutzt, um die Eignung der Methode simulativ zu überprüfen.

Für die prototypische Umsetzung wurden entsprechende Kommunikationsmodule bestehend aus Funkmodulen des Typs XBee und Mikrocontrollern zur Ansteuerung sowie die notwendige Software zur Umsetzung der Methode in einem Gesamtkonzept entwickelt. In einer experimentellen Erprobung erfolgte die Überprüfung der prototypisch umgesetzten Methode in verschiedenen Szenarien. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität, eine Robustheit der Methode und eine sehr gute praktische Eignung.

Die Methode wurde für kleine Teilnehmerzahlen mit bis zu acht Teilnehmern und den hochfrequenten Austausch von relativ umfangreichen GPS-Rohdatensätzen konzeptioniert, umgesetzt und experimentell erprobt. Grundsätzlich ist die Methode aber auch auf andere Szenarien mit anderen Anforderungen übertragbar und kann diesen entsprechend angepasst werden. Bei größeren Teilnehmerzahlen kann z. B. die Integration eines dynamischen Frequenzwechsels zusätzliche Übertragungskapazitäten beim eigentlichen Datenaustausch schaffen.

## Literaturverzeichnis

- [5GA17] 5G Automotive Association e. V.: 5GAA-Road-safety-FINAL2017-12-05. <http://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/5GAA-Road-safety-FINAL2017-12-05.pdf>, 10.06.2019.
- [Agri19] Agricultural Industry Electronics Foundation e.V.: AEF – Wireless In-Field Communication. <https://www.aef-online.org/de/die-aef/aktivitaeten/activity-report.html>, 28.07.2019.
- [Alam14] Alam, A.: Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning. Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014.
- [Asce14] Ascending Technologies GmbH: Hersteller von innovativen Luftbild-Drohnen und Research UAVs. <http://www.asctec.de/home-de/>, 15.07.2014.
- [Atme15] Atmel Corporation:  
ATmega164A/164PA/324A/324PA/644A/644PA/1284/1284P.  
[http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8272-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega164A\\_PA-324A\\_PA-644A\\_PA-1284\\_P\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8272-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega164A_PA-324A_PA-644A_PA-1284_P_datasheet.pdf), 31.07.2018.
- [AuKl08] Autermann, L.; Kluge, A.: Die Landmaschine im Datennetzwerk - Anforderungen an die Kommunikation. Ein Überblick. In (VDI-MEG Hrsg.): Land.Technik 2008 Landtechnik regional und international. Tagung Stuttgart-Hohenheim, 25. und 26. September 2008. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008; S. 387–395.
- [BeDe09] Bernardi, A.; Dengel, A.: iGreen: Mobile Plattform für organisationsübergreifendes Wissensmanagement. Standortbezogene Dienste im Agrarbereich als Beispiel einer umfassenden Lösung in öffentlich-privater Kooperation. In (Bentele, M. et al. Hrsg.): Geteiltes Wissen ist doppeltes Wissen! Kongressband zur KnowTech 2009. CMP-WEKA-Verl, Haar, 2009; S. 631–638.
- [Beij02] Beijar, N. S.: Zone Routing Protocol (ZRP). Universität Helsinki.  
<http://www.utdallas.edu/~ksarac/courses/Papers/ZRP.pdf>, 03.11.2014.
- [BMEL19] BMEL: Neue Förderung: Digitale Experimentierfelder.  
[https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/\\_Texte/DigitaleExperimentierfelder.html](https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/_Texte/DigitaleExperimentierfelder.html), 02.06.2019.
- [BoMh12] Bobade, N. P.; Mhala, N. N.: Performance Evaluation of AODV and DSR On-Demand Routing Protocols With Varying MANET Size. In International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2012, 4; S. 183–196.

- 
- [BrER10] Bruns, I.; Eichler, C.; Rustemeyer, T.: Robot2business - Informationstechnische Integration teilautonomer, mobiler Maschinen und Prozesse in Geschäfts- und Dienstleistungsmodellen (R2B). Titel des Teilvorhaben: Konfigurator für selbstorganisierende Vernetzung ; Schlussbericht ; Verbundvorhaben ; Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2006 bis 30.06.2010. eck\*cellent IT GmbH, 2010.
  - [ClJa03] Clausen, T.; Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). <https://tools.ietf.org/pdf/rfc3626.pdf>, 06.06.2016.
  - [ClRe13] Claas Gruppe; Reinecke, M.: MARION - Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten. Verbundvorhaben ; Schlussbericht - Konsortialbericht ; Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2010 bis 30.11.2013. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2013.
  - [Colv83] Colvin, A.: CSMA with collision avoidance, 1983, 6; S. 227–235.
  - [Cost06] Costa-Requena, J. et al.: AODV-OLSR Scalable Ad hoc Routing Proposal: 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 2006. 16 - 18 Jan. 2006, [Phuket, Thailand ; ISWPC]. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 2006; S. 1–5.
  - [Couc14] Couceiro, M. S. et al.: Darwinian swarm exploration under communication constraints: Initial deployment and fault-tolerance assessment. In *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62; S. 528–544.
  - [DaZi83] Day, J. D.; Zimmermann, H.: The OSI reference model. In *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71; S. 1334–1340.
  - [Deer15] Deere & Company: John Deere StarFire 3000 Empfänger Agrar-Management-Systemlösungen (AMS). [https://www.deere.de/de\\_DE/products/equipment/agricultural\\_management\\_solutions/displays\\_and\\_receivers/starfire\\_3000\\_receiver/starfire\\_3000\\_receiver.page](https://www.deere.de/de_DE/products/equipment/agricultural_management_solutions/displays_and_receivers/starfire_3000_receiver/starfire_3000_receiver.page), 19.03.2015.
  - [Deut14] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, DFKI: Das iGreen Projekt. <http://www.igreen-projekt.de/iGreen/>, 10.06.2019.
  - [Deut17] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI): Smarte Daten, Smarte Dienste. Landwirtschaftliche Datendrehscheibe für effiziente, ressourcenschonende Prozesse. <http://http://sdsd-projekt.de/>, 28.07.2019.
  - [Deut19] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI): Offene Software-Plattform für Dienstleistungsinnovationen in einem Wertschöpfungsnetz in der Landwirtschaft. <https://www.odil-projekt.de/de/startseite.html>, 28.07.2019.

- [Dies17] Diestel, R.: Graphentheorie. Springer Spektrum, Berlin, 2017.
- [Digi12] Digi International Inc.: Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol. For RF Module Part Numbers: XB24-A...-001, XBP24-A...-001, 2012.
- [Digi14] Digi International Inc.: Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol. [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982\\_P.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_P.pdf), 11.08.2014.
- [DKE19] DKE-Data Verwaltungs GmbH: DKE agrirouter. <https://my-agrirouter.com/de/>, 02.06.2019.
- [DoJa96] Dommety, G.; Jain, R.: Potential Networking Applications of Global Positioning Systems (GPS), Ohio, 1996.
- [Enke03a] Enkelmann, W.: FleetNet - applications for inter-vehicle communication: Proceedings IEEE IV 2003, Intelligent Vehicles Symposium Hilton Hotel, Columbus, Ohio, June 9 -11, 2003. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 2003a; S. 162–167.
- [Enke03b] Enkelmann, W. et al.: FleetNet – Anwendungen für mobile Ad-hoc-Netzwerke. In PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, 2003b, 26; S. 197–202.
- [Fest15] Festag, A.: Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G. In e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2015, 132; S. 409–416.
- [Frau04] Fraunhofer: NOW: Network On Wheels. <https://www.fokus.fraunhofer.de/2f643d5e7a65fcf7>, 10.06.2019.
- [Frau08a] Fraunhofer: PRE-DRIVE C2X. <https://www.fokus.fraunhofer.de/3b4db826a9b4c53e>, 10.06.2019.
- [Frau08b] Fraunhofer: simTD. <https://www.fokus.fraunhofer.de/b93b22fb2a32c929>, 10.06.2019.
- [Frau10] Fraunhofer: DRIVE C2X. [https://www.fokus.fraunhofer.de/go/drive\\_c2X](https://www.fokus.fraunhofer.de/go/drive_c2X), 10.06.2019.
- [FrHM05] Franz, W.; Hartenstein, H.; Mauve, M.: Inter-vehicle communications based on ad hoc networking principles. The FleetNet project. Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe, 2005.
- [Garg07] Garg, V. K.: Wireless communications and networking. Morgan Kaufmann, Amsterdam, 2007.

- 
- [GöHa07] Göres, T.; Harms, H.-H.: Datenmanagementsystem für den Teleservice bei mobilen Arbeitsmaschinen. 328–329 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 62 Nr. 5 (2007). <https://doi.org/10.15150/lt.2007.1003>, 30.01.2015.
  - [Göre09] Göres, T.: Methoden zur Datenkompression für den Telematikeinsatz am Beispiel mobiler Arbeitsmaschinen. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009. Shaker, Aachen, 2009.
  - [GrDi92] Grill, G.; Digel, W.: Meyers großes Taschenlexikon. In 24 Bänden. BI-Taschenbuchverl., Mannheim, 1992.
  - [Haas97] Haas, Z. J.: A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks: Bridging the way to the 21st century. 1997 IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications record ; 12 - 16 October 1997, Hotel Del Coronado, San Diego, CA, USA ; conference record. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 1997; S. 562–566.
  - [HeBe13] Hecker, P.; Becker, M.: Navigation zur Exploration mit tieffliegenden UAV in Katastrophenszenarien. NExt UAV ; Schlussbericht ; Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2010 - 30.06.2013. Techn. Univ., Inst. für Flugführung, Braunschweig, 2013.
  - [Heck14] Hecker, P.: Satellitennavigation. Technologien und Anwendungen. Vorlesungsumdruck, Braunschweig, 2014.
  - [Hors14] Horstmann, J.: Moderne Kommunikationssysteme in der Landtechnik. In (Frerichs, L. Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2013, Braunschweig, 2014; S. 1–7.
  - [Hors17] Horstmann, J.: Kommunikationssysteme in der Landtechnik. In (Frerichs, L. Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2016, Braunschweig, 2017; S. 1–7.
  - [IEEE11] IEEE Computer Society Press LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society: IEEE Std 802.15.4-2011, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2011.
  - [ImNa99] Imieliński, T.; Navas, J. C.: GPS-based geographic addressing, routing, and resource discovery. The Global Positioning System can be used to give every terminal a geographic address for multicasting to and from recipients within specified geographical areas. In Communications of the ACM, 1999, 42; S. 86–92.
  - [Inst18] Institut für Agrartechnologie: Vernetzungs- und Transferprojekt zur Digitalisierung in der Landwirtschaft. <https://www.thuenen.de/de/at/projekte/digitalisierung-und->

- automatisierung/vernetzungs-und-transferprojekt-zur-digitalisierung-in-der-landwirtschaft/, 19.09.2019.
- [Inst19] Institut für Maschinenkonstruktion und Systemtechnik: Big Data im landwirtschaftlichen Prozess innovativ nutzen. [https://www.km.tu-berlin.de/menue/forschung/projekte/aktuelle\\_projekte/projekt\\_bidalap/](https://www.km.tu-berlin.de/menue/forschung/projekte/aktuelle_projekte/projekt_bidalap/), 28.07.2019.
- [John95] Johnson, D. B.: Routing in ad hoc networks of mobile hosts. In (IEEE Computer Society Press Hrsg.): Proceedings Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, December 8-9, 1994, Santa Cruz, California. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, Calif., 1995; S. 158–163.
- [KöOt02] Köck, P.; Ott, H.: Wörterbuch für Erziehung und Unterricht. 3100 Begriffe aus den Bereichen Pädagogik, Didaktik, Psychologie, Soziologie, Sozialwesen. Auer, Donauwörth, 2002.
- [KoVa00] Ko, Y.-B.; Vaidya, N. H.: Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. In Wireless Networks, 2000, 6; S. 307–321.
- [KoVa99a] Ko, Y.-b.; Vaidya, N. H.: Geocasting in mobile ad hoc networks: location-based multicast algorithms: Proceedings Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications February 25 - 26, 1999, New Orleans, Louisiana. IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., 1999a; S. 101–110.
- [KoVa99b] Ko, Y.-b.; Vaidya, N. H.: Using location information in wireless ad hoc networks: 1999 IEEE 49th Vehicular Technology Conference - Moving Into a New Millenium. Houston, Texas, USA, May 16 - 20. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 1999b; S. 1952–1956.
- [Kull12] Kulla, E. et al.: Performance comparison of OLSR and BATMAN routing protocols by a MANET testbed in stairs environment. In Computers & Mathematics with Applications, 2012, 63; S. 339–349.
- [Lang02] Lang, T.: Mechatronik für mobile Arbeitsmaschinen am Beispiel eines Dreipunktkrafthebers. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2002. Shaker, Aachen, 2002.
- [LiWu16] Lindner, M.; Wunderlich, S.: Open-Mesh - B.A.T.M.A.N. <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>, 21.09.2019.
- [Malk13] Malkin, G.: Internet Users' Glossary. <http://www.rfc-base.org/txt/rfc-1983.txt>, 15.07.2014.



- 
- [Mans04] Mansfeld, W.: Satellitenortung und Navigation. Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Vieweg, Wiesbaden, 2004.
- [MeKD98] Meyer, H. J.; Kausch, C.; Diekhans, N.: Teleservicesysteme - Einsatzpotential bei Landmaschinen. Teleservice systems - Application potential for farm machines. In Landtechnik, 1998, 53; S. 104–105.
- [MeRu08] Meyer, H. J.; Rusch, C.: Selbstkonfigurierende Drahtlosnetzwerke in der Landwirtschaft. In Landtechnik, 2008, 63; S. 230–231.
- [MiKa09] Mittal, S.; Kaur, P.: Performance Comparison of AODV, DSR and ZRP Routing Protocols in MANET'S: Telecommunication Technologies (ACT) // International Conference on Advances in Computing, Control, & Telecommunication Technologies, 2009. ACT '09 ; 28 - 29 Dec. 2009, Trivandrum, Kerala, India ; proceedings. IEEE, Piscataway, NJ, 2009; S. 165–168.
- [Omni15] OmniSTAR: Leader in Differential GNSS Solutions Worldwide. <http://www.omnistar.com/>, 19.03.2015.
- [Osse14] Osseiran, A. et al.: Scenarios for 5G mobile and wireless communications. The vision of the METIS project. In IEEE Communications Magazine, 2014, 52; S. 26–35.
- [PeBh94] Perkins, C. E.; Bhagwat, P.: Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers: Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications. ACM, New York, NY, 1994; S. 234–244.
- [PeRo99] Perkins, C. E.; Royer, E. M.: Ad-hoc on-demand distance vector routing: Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications // Proceedings Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications February 25 - 26, 1999, New Orleans, Louisiana. IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., 1999; S. 90–100.
- [Pros19] Proskawetz, K.-O.: CAR 2 CAR Communication Consortium. <http://www.car-to-car.org/>, 27.07.2019.
- [RuMe08] Rusch, C.; Meyer, H. J.: Landwirtschaftliches, selbstkonfigurierendes Kommunikationssystem zur Überwachung, Optimierung und Dokumentation von Ernteprozessen. In (VDI-MEG Hrsg.): Land.Technik 2008 Landtechnik regional und international. Tagung Stuttgart-Hohenheim, 25. und 26. September 2008. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008; S. 359–365.
- [Rusc12] Rusch, C.: Untersuchung der Datensicherheit selbstkonfigurierender Funknetzwerke im Bereich von mobilen Arbeitsmaschinen am Beispiel der

- Prozessdokumentation. Zugl.: Berlin, Univ., Diss., 2012. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Saarbrücken, 2012.
- [Rusc14] Rusch, C. et al.: M2M-Teledesk – Manufacturer independent telemetry solution for agricultural machinery. In (Hecker, P.; Niemeier, W.; Frerichs, L. Hrsg.): MCG\_2014 Proceedings of the 4th International Conference on Machine Control and Guidance (MCG) 19th - 20th March 2014. TU Braunschweig, Braunschweig, 2014; S. 223–227.
- [Scha12] Schattenberg, J. et al.: Mobile ad-hoc communication in machine swarms for relative positioning based on GNSS-raw data exchange: Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. April 23-26, 2012 Myrtle Beach Marriott Resort & Spa, Myrtle Beach, South Carolina. IEEE, Piscataway, 2012; S. 1265–1273.
- [Scha13a] Schattenberg, J. et al.: Data exchange in swarms of mobile vehicles for positioning, control and navigation: Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting; S. 780–792.
- [Scha13b] Schattenberg, J. et al.: Datenaustausch in mobilen Maschinenverbänden zur echtzeitfähigen Positionierung. In Landtechnik, 2013, Bd. 68; S. 359–364.
- [Scha14] Schattenberg, J. et al.: Data exchange within clusters of mobile machines for realtime positioning. In (Hecker, P.; Niemeier, W.; Frerichs, L. Hrsg.): MCG\_2014 Proceedings of the 4th International Conference on Machine Control and Guidance (MCG) 19th - 20th March 2014. TU Braunschweig, Braunschweig, 2014; S. 200–213.
- [Sche10] Scherer, M. et al.: Machine diagnostics in scope of the LaSeKo project. In (Schulze Lammers, P. Hrsg.): 2nd International Conference on Machine Control & Guidance. Proceedings ; March 9-11, 2010. Inst. für Geodäsie und Geoinformation, Bonn, 2010; S. 117–124.
- [Schi03] Schiller, J. H.: Mobile communications. Addison-Wesley, London, Boston, 2003.
- [ShNa02] Shah, S. H.; Nahrstedt, K.: Predictive location-based QoS routing in mobile ad hoc networks: Conference proceedings 2002 IEEE International Conference on Communications 28 April - 2 May 2002, New York, NY, USA. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 2002; S. 1022–1027.
- [Sjob17] Sjoberg, K. et al.: Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe. Current Deployment Status and Outlook. In IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, 12; S. 89–97.

- 
- [Sonn19] Sonnen, J.: Digitalisierung und Vernetzung. In (Frerichs, L. Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2018, Braunschweig, 2019; S. 1–11.
- [Spri15] Springer Gabler Verlag: Gabler Wirtschaftslexikon. Kommunikation. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54937/kommunikation-v9.html>, 19.03.2015.
- [Stec11] Steckel, T.: Verbundvorhaben "Robot2business - Informationstechnische Integration teilautonomer, mobiler Maschinen und Prozesse in Geschäfts- und Dienstleistungsmodellen (r2b)". Teilvorhaben: Selbstorganisation und teilautonome Funktionen in der Grünfütterernte ; Schlussbericht ; Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2006 bis 30.06.2010. Claas Selbstfahrende Erntemaschinen, 2011.
- [SuGe99] Su, W.; Gerla, M.: IPv6 flow handoff in ad hoc wireless networks using mobility prediction: Symposium on Communication Theory, Symposium on Future Wireless Communication System. IEEE Operations Center, Piscataway, NJ, 1999; S. 271–275.
- [Tane03] Tanenbaum, A. S.: Computernetzwerke. Pearson Studium, München [u.a.], 2003.
- [Turr15] Turri, V.: Fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning through look-ahead control. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.
- [ublo13] u-blox AG: u-blox6\_ReceiverDescrProtSpec\_%28GPS.G6-SW-10018%29\_Public. [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6\\_ReceiverDescrProtSpec\\_%28GPS.G6-SW-10018%29\\_Public.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6_ReceiverDescrProtSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29_Public.pdf), 24.07.2018.
- [Verb19] Verband der Automobilindustrie: Platooning – Innovation im Güterverkehr. <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/intelligenter-strassenverkehr.html>, 17.09.2019.
- [WaBJ96] Watzlawick, P.; Bavelas, J. H.; Jackson, D. D.: Menschliche Kommunikation. Formen, Störungen, Paradoxien. Huber, Bern, 1996.
- [Welt09] Weltzien, C.: Assistenzsystem für den Überladevorgang bei einem selbstfahrenden Feldhäcksler. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2008. Shaker, Aachen, 2009.
- [Wiki14] Wikipedia: Global System for Mobile Communications. [http://de.wikipedia.org/wiki/Global\\_System\\_for\\_Mobile\\_Communications](http://de.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications), 21.07.2014.

- 
- [Zent19] Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen: Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN). <https://www.zdin.de/>, 17.09.2019.
- [ZigB14] ZigBee Alliance: ZigBee Alliance > Home. <http://zigbee.org/>, 18.08.2014.
- [ZiLe77] Ziv, J.; Lempel, A.: A universal algorithm for sequential data compression. In IEEE Transactions on Information Theory, 1977, 23; S. 337–343.
- [zlib17] zlib: zlib Home Site. <https://zlib.net/>, 03.08.2018.

